

**Alma Mater Studiorum – Università di Bologna**

**DOTTORATO DI RICERCA IN**  
**MECCANICA E SCIENZE AVANZATE DELL'INGEGNERIA**  
**- PROGETTO N°2: INGEGNERIA DELLE MACCHINE E**  
**DEI SISTEMI ENERGETICI**

**Ciclo XXVIII**

**Settore Concorsuale di afferenza:** 09/B2 – Impianti Industriali Meccanici

**Settore Scientifico disciplinare:** ING-IND/17 – Impianti Industriali Meccanici

**TITOLO TESI**

**ABBATTIMENTO DEL PARTICOLATO SOTTILE NEGLI IMPIANTI DI**  
**COMBUSTIONE A BIOMASSE DI PICCOLA TAGLIA**

**Presentata da:**     **Dott. Ing. Golferà Luca**

**Coordinatore Dottorato**

**Relatore**

**Prof. Ing. Vincenzo Parenti Castelli**

**Prof. Ing. Cesare Sacconi**

**Esame finale anno 2016**

## *Indice*

Indice .....	1
Introduzione.....	5
1 Stato dell'arte e quadro normativo .....	9
1.1 Il risparmio legato al riscaldamento con la biomassa.....	10
1.2 La biomassa come fonte di energia rinnovabile e l'obiettivo europeo.....	12
1.3 Particolato atmosferico .....	12
1.4 Classificazione del particolato.....	13
1.5 Il problema del particolato.....	16
1.6 L'esigenza di un sistema di filtrazione del particolato derivante dalla combustione di biomassa.....	19
1.7 Quadro normativo europeo ed italiano .....	20
2. Sistemi di filtrazione.....	27
2.1 SISTEMI DI RIMOZIONE A SECCO .....	27
2.1.1 Camera di sedimentazione.....	27
2.1.2 Cicloni .....	30
2.1.3 Filtri a maniche.....	33
2.1.4 Precipitatori elettrostatici.....	37
2.2. SISTEMI DI RIMOZIONE A UMIDO .....	42
2.2.1 Precipitatori elettrostatici ad umido.....	42
2.2.2 Cicloni a umido .....	43
2.2.3 Torre di lavaggio - Spray scrubber .....	45
2.2.4 Scrubber ad umido – Scrubber Venturi .....	46
2.3 Efficienza di filtrazione .....	52
2.4 Meccanismi di cattura del particolato.....	53
2.4.1 Impatto inerziale.....	53
2.4.2 Intercettazione diretta .....	54
2.4.3 Diffusione browniana .....	56
2.4.4 Valutazione dell'efficienza di filtrazione dei singoli meccanismi .....	57

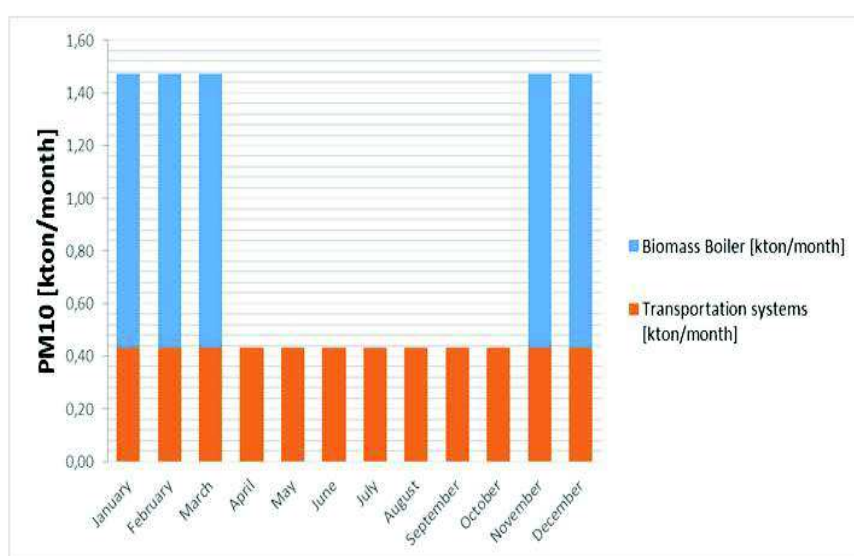
2.5 Efficienza di filtrazione di una goccia di liquido in una torre di lavaggio .....	57
2.5.1 Campo di moto attorno ad una sfera.....	59
2.5.2 Traiettoria della particella.....	61
2.5.3 Linee di corrente limite ed efficienza di filtrazione dei meccanismi .....	65
2.6 Efficienza dei meccanismi di cattura del particolato con gocce di acqua .....	67
2.6.1 Efficienza di filtrazione per impatto .....	67
2.6.2 Efficienza di filtrazione per intercettazione.....	71
2.6.3 Efficienza di filtrazione per diffusione .....	74
2.6.4 Efficienza di cattura complessiva con gocce di acqua .....	78
2.7 Ulteriori meccanismi di cattura presi in considerazione .....	81
2.7.1 Condensazione eterogenea .....	81
3. Descrizione impianto sperimentale .....	86
3.1 Impianto di sperimentazione .....	86
3.1.1 Caldaia .....	87
3.1.2 Circuito idraulico .....	89
3.1.3 Circuito dei fumi.....	91
3.2 LabView e acquisizione dei segnali .....	93
3.3 Strumenti di misura .....	103
3.3.1 Portata di aria in ingresso alla caldaia .....	103
3.3.2 Portata dei fumi .....	106
3.3.3 Portata d'acqua .....	111
3.3.4 Misure di temperatura.....	113
3.4 Procedura sull'impianto sperimentale .....	124
4 Procedura di campionamento e misura delle PM .....	126
4.1 Introduzione ai campionamenti .....	126
4.2 Strumentazione Tecora .....	128
4.2.1 ISOSTACK G4 ONE 8 M3/H 220 V .....	130
4.2.2 Tubo PITOT S XL PER CICL.PM10 + 2.5 .....	130

4.2.3 Trappola per gel di silice .....	131
4.2.4 Filtri di campionamento.....	132
4.2.5 Impattore per polveri totali .....	134
4.2.6 Impattore multistadio Tecora MSSI .....	134
4.3 Punto di campionamento .....	139
4.4 Campionamenti ambientali.....	140
4.5 Tipo di campionamenti condotti.....	143
4.6 Quadro normativo di riferimento per i campionamenti.....	144
4.7 Procedure in laboratorio e strumentazione .....	148
5. Modellizzazione.....	154
5.1 Caratteristiche delle gocce di acqua .....	154
5.2 Carico e distribuzione granulometrica del particolato proveniente dalla combustione della biomassa .....	156
5.3 Modello matematico previsionale .....	159
6. Progettazione e realizzazione .....	164
6.1 Torre di lavaggio ad ugelli contrapposti.....	164
6.2 Atomizzazione con effetto Venturi e battente d'acqua .....	169
7 Analisi dei risultati e progettazione dell'impianto sperimentale con parametri ottimizzati .....	177
7.1 Analisi dei risultati ottenuti .....	177
7.2 Atomizzazione con filtraggio a letto fisso.....	178
7.3 Ottimizzazione dei parametri di progettazione della nuova configurazione della torre di lavaggio.....	184
7.3.1 Ottimizzazione dei parametri per la cattura con gocce di acqua .....	184
7.3.2 Ottimizzazione dei parametri per la cattura con corpi sferici.....	189
7.3.4 Scelta dei parametri che ottimizzano la configurazione “atomizzazione con filtraggio a letto fisso” e stima dell'efficienza.....	193
7.5 Valutazione delle perdite di carico e dei consumi energetici della torre.....	195
8 Conclusioni.....	201

9 Linee di approfondimento e future attività di ricerca .....	203
10 Nomenclatura.....	205
11 Appendice.....	209
11 Bibliografia.....	231

## Introduzione

I limiti di polveri sottili in ambiente stabiliti dall'Unione Europea, pari a  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  superabile per non più di 35 volte all'anno, vengono attualmente superati nei periodi invernali a causa dall'impiego nel riscaldamento civile di impianti alimentati a biomassa.



**Figura 1 Il grafico mostra come il superamento dei limiti di PM, che avviene solo nel periodo invernale, sia causato in maggior parte dalla combustione della biomassa**

Il problema fondamentale dell'utilizzo della biomassa come combustibile è l'elevata formazione nei fumi di particolato fine ed ultra-fine (PM10 e PM2.5), con conseguente peggioramento della qualità dell'aria e della salute dell'uomo.

Questo panorama è aggravato dal fatto che al momento non ci sono normative che impongono un limite sulle emissioni per le caldaie a biomassa di piccole dimensioni (potenza termica inferiore a 35 kW) che sono comunque estremamente diffuse.

Gli obiettivi della tesi sono la progettazione, la realizzazione e la sperimentazione di un dispositivo per la filtrazione del particolato per le caldaie di piccola dimensione ad uso domestico.

In particolare il sistema di filtrazione che si vuole ottenere deve essere caratterizzato da:

- un'elevata efficienza di filtrazione (maggiore del 99,9%);
- un basso consumo energetico specifico (minore di 10 Wh/Nm<sup>3</sup>).
- una elevata facilità di installazione in modo che si presenti come una soluzione facilmente implementabile anche su caldaie già esistenti che lavorano anche con combustibili differenti
- una facile manutenzione che non richieda personale specializzato

Esistono già sistemi di filtrazione a livello industriale che realizzano prestazioni così spinte in termini di rendimento, ma sono troppo onerosi sia in termini di costi di acquisto che di esercizio e richiedono una manutenzione troppo complicata per applicazioni domestiche.

Per raggiungere gli obiettivi, nei laboratori del Dipartimento di Ingegneria Industriale, è stato allestito un impianto costituito da una caldaia a biomassa di 25 kW termici con relativo impianto di dissipazione dell'energia termica generata. L'intero impianto è stato corredato con strumenti di misura per caratterizzarne il comportamento; per l'acquisizione dei dati ricavati nelle prove eseguite si è fatto ricorso alla strumentazione compactRIO della National Instruments e si sono scritti i programmi necessari.

In seguito è stata individuata e acquistata la strumentazione necessaria per campionare e misurare la concentrazione massica di particolato presente nei gas di scarico, rispettando la normativa vigente.

La tecnologia scelta, per realizzare un filtro efficiente e a basso consumo energetico, è stata quella dei wet scrubbers. L'analisi delle prove realizzate in precedenza e dei risultati ottenuti permette di valutarne vantaggi e limiti, per procedere poi con la progettazione di un sistema di filtrazione che soddisfi gli obiettivi prefissati.

Dalla valutazione dei meccanismi di cattura che intervengono (impatto, intercettazione, diffusione) si sono realizzate gli impianti sperimentali che hanno permesso di verificare praticamente l'influenza dei meccanismi in funzione del diametro delle particelle: torre di lavaggio ad ugelli contrapposti, atomizzazione con effetto Venturi, atomizzazione con filtraggio a letto fisso.

I risultati ottenuti nelle configurazioni testate sono stati quindi utilizzati per realizzare un modello matematico che permetta di confrontare l'efficacia dei vari parametri sull'efficienza globale di cattura del particolato emesso dalla caldaia in funzione del suo carico e della sua granulometria; l'impiego dei risultati già ottenuti alla definizione del modello matematico si è reso necessario in quanto alcuni parametri sono empirici in funzione dell'impianto stesso.

Tramite il modello si è infine identificata una soluzione per raggiungere gli obiettivi in termini di efficienza e consumi; comunque questi risultati potranno essere validati solo con ulteriori prove sull'impianto. I test consentiranno di apportare ulteriori modifiche sia all'impianto, sia al modello matematico, per avvicinare gli output dell'analisi teorica e della sperimentazione, così da avere uno strumento per la stima dell'efficienza, verificabile successivamente sul campo.





## *1 Stato dell'arte e quadro normativo*

Negli ultimi anni l'utilizzo di biomassa, per la produzione di energia e per la combustione non industriale, è molto aumentato per due principali motivi: da una parte il rincaro dei combustibili fossili tradizionali (petrolio e gas naturale) ha spinto verso l'utilizzo di combustibili solidi, più economici, soprattutto per quanto riguarda il riscaldamento domestico; dall'altra l'uso di biomassa è stato incentivato per raggiungere l'obiettivo imposto dall'Unione Europea, secondo il quale entro il 2020 le emissioni di gas serra vanno ridotte del 20% rispetto i valori raggiunti nel 1990 [1].

Uno dei vantaggi della combustione della biomassa è infatti la riduzione dell'emissione di CO<sub>2</sub> in atmosfera: la quantità di anidride carbonica liberata da questo combustibile è la stessa che le piante assorbono durante il loro accrescimento, rendendo il bilancio dei gas serra nullo, a differenza dei combustibili fossili che bruciando, liberano in poco tempo la CO<sub>2</sub> che hanno accumulato in milioni di anni.

Oltre ad evitare l'alterazione dell'equilibrio dei gas serra emessi nell'ambiente, prima causa del riscaldamento globale e dei cambiamenti climatici, la combustione di biomassa limita anche i livelli di altri inquinanti come gli NO<sub>x</sub> e gli SO<sub>x</sub>.

Fonte inquinante	Consumi	Unità di misura	COV	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>
			kg/anno	kg/anno	kg/anno
automobile media	15000	km/anno	5,4	7,9	0,7
mezzo pesante medio	35000	km/anno	48,7	235,5	11,9
camino aperto	4,0	t/anno	117,0	4,2	20,9
stufa tradizionale	4,0	t/anno	46,0	4,2	10,5
camino chiuso	4,0	t/anno	46,0	4,2	10,5
stufa innovativa	3,5	t/anno	20,1	0,8	1,9
stufa a pellets	3,5	t/anno	4,0	3,7	2,6
emissioni medie per famiglia	2488	m <sup>3</sup> /anno	0,2	1,4	0,0

Le stime si basano sui dati dell'inventario regionale delle emissioni e sono state eseguite considerando le caratteristiche delle automobili e mezzi pesanti che compongono il parco circolante in regione nel 2010. I consumi di biomassa bruciata in camini aperti, stufe tradizionali, stufe innovative e stufe a pellets derivano dall'indagine sui consumi di biomassa in Emilia-Romagna (Emilia-Romagna, 2011). Le emissioni medie per famiglia fanno riferimento a caldaie di potenza inferiore a 50 MW alimentate a metano. I consumi di metano per famiglia sono forniti dall'autorità nazionale per l'energia (Aeeg).

**Tabella 1. 1 Valori tipici delle emissioni di alcuni inquinanti atmosferici per diverse tipologie di sorgenti.**

Il problema fondamentale dell'utilizzo della biomassa come combustibile è però un'elevata formazione di particolato fine ed ultrafine (PM<sub>10</sub> e PM<sub>2,5</sub>), che peggiora la qualità dell'aria, determinando rischi per la salute dell'uomo e per l'ambiente.

### 1.1 Il risparmio legato al riscaldamento con la biomassa

La biomassa è un valido combustibile da usare come alternativa ai combustibili fossili, e soprattutto è economico. Per valutare il risparmio ad essa legato è necessario però tenere in considerazione la qualità della biomassa, le prestazioni del dispositivo di riscaldamento e la sua manutenzione, fattori che agiscono sul rendimento di combustione.

Una delle caratteristiche più importanti è l'umidità che deve essere il più contenuta possibile, in caso contrario la combustione si allontana dalle condizioni ottimali generando meno calore ed aumentando la produzione di polveri sottili.

Prendendo ad esempio la legna, se questa ha un'umidità del 20%, è in grado di fornire potenzialmente 10 kWh per ogni 2,5 kg di materiale bruciato (stessa energia prodotta da

1 m<sup>3</sup> di gas metano o da 1 litro di gasolio), quantità che cresce a 4,5 kg se invece la sua umidità è del 50%.

Utilizzando una moderna caldaia a biomassa e realizzando una manutenzione regolare e corretta, i costi del riscaldamento dimezzano rispetto all'uso di gas metano. Considerando i prezzi attuali (marzo 2015), volendo riscaldare un appartamento di 100 mq e ipotizzando un fabbisogno di circa 200 kWh/mq, in un anno bisogna fornire 20 000 kWh: se si usa una caldaia a condensazione servono circa 200 m<sup>3</sup> di metano che, al prezzo di 0,85 €/m<sup>3</sup> determina una spesa di 1700 € all'anno. Generando la stessa energia con una moderna caldaia a legna (rendimento del'85%), servono 6000 kg di materiale da bruciare (con la giusta umidità) che, costando 0,14€/kg, equivalgono a 840 € all'anno, ossia circa la metà della spesa che si avrebbe con il metano [1].

## **1.2 La biomassa come fonte di energia rinnovabile e l'obiettivo europeo**

La normativa italiana intende la biomassa come fonte rinnovabile e la definisce come “la frazione biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui di origine biologica provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali), dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, comprese la pesca e l'acquacoltura, gli sfalci e le potature provenienti dal verde pubblico e privato, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani” (D.lgs. 28/2011).

Poiché la biomassa è considerata dalla normativa una fonte di energia rinnovabile, essa gioca un ruolo importante per l'ottenimento del traguardo prescritto dalla direttiva 2009/28/CE dell'Unione Europea, che obbliga l'Italia a realizzare, entro il 2020, il 17% dell'energia necessaria a coprire il fabbisogno complessivo con fonti rinnovabili.

In particolare il piano d'azione nazionale prevede che all'anno in riferimento, circa il 10% dell'energia rinnovabile sia realizzata con l'utilizzo della biomassa e che questa venga utilizzata soprattutto per il riscaldamento domestico tramite piccoli impianti che devono fornire, sempre al 2020, energia pari a 0,3 Mtep (tep, tonnellata equivalente di petrolio, è la quantità di energia rilasciata dalla combustione di una tonnellata di petrolio grezzo e corrisponde circa a 42 GJ).

Scendendo nel dettaglio, il piano energetico approvato dalla Regione prevede che in Emilia-Romagna la quota compresa tra 4500 e 5060 MW sia realizzata da fonti rinnovabili e di questa parte il 30% deve derivare da impianti di combustione di biomassa.

## **1.3 Particolato atmosferico**

A causa di una cattiva combustione o di una cattiva qualità del combustibile le biomasse possono rivelarsi molto dannose per l'ambiente, immettendo nell'aria, a seguito della combustione, sostanze nocive per la salute umana. Rispetto ai combustibili fossili presentano valori nettamente inferiori in fatto di inquinanti gassosi mentre, per il particolato, emettono concentrazioni più alte. I principali agenti inquinanti presenti oltre al particolato e derivati dalla combustione della biomassa sono:

- **Ossidi di azoto:** (NO<sub>x</sub>) si vengono a creare a causa dell'ossidazione dell'azoto molecolare (N<sub>2</sub>) durante i processi di combustione che avvengono ad elevate temperature e a causa dell'ossidazione dei composti azotati presenti nel combustibile (definiti come NO<sub>x</sub> da combustibile).
- **Gas acidi:** a questo gruppo appartiene ad esempio l'anidride solforosa (SO<sub>2</sub>). Sono i principali responsabili delle piogge acide.
- **Monossido di carbonio:** (CO) viene originato dalla combustione incompleta dei composti organici e la sua rilevazione supporta l'analisi delle condizioni di combustione.
- **Acidi solfidrici e cloridrici:** (H<sub>2</sub>S e HCl) sono responsabili di corrosione ad alte temperature e delle piogge acide.
- **Composti a base di azoto:** (NH<sub>3</sub> e HCN) sono i principali responsabili della formazione degli NO<sub>x</sub>

## 1.4 Classificazione del particolato

Per particolato PM (Particulate Matter) si intende l'insieme delle sostanze sospese in aria (fibre, metalli, particelle carboniose, silice) con un diametro che va da pochi nanometri fino a pochi micron e rappresenta l'inquinante con maggiore impatto nelle aree urbane. In base alle dimensioni ed alla natura delle particelle è possibile suddividerlo in 7 classi:

- Aerosol che comprende particelle liquide o solide di diametro minore di 1 µm e si tratta di dispersioni di tipo colloidale; Esalazioni che rappresenta le particelle solide con diametro minore di 1 µm, in genere prodotte dai processi industriali;
- Foschie ovvero goccioline di liquido con un diametro inferiore ai 2 µm;
- Fumi cioè particelle solide di diametro minore di 2 µm;
- Polveri che comprende le particelle solide di diametro variabile tra 0,25 µm e 500 µm;

- Le sabbie che sono particelle solide di diametro maggiore di 500  $\mu\text{m}$ . La quantità di polveri sospese viene misurata in maniera quantitativa in base al peso o al volume.

Il principale meccanismo di formazione del particolato è dovuto al fenomeno della nucleazione la quale, partendo da particelle di dimensioni minime, tende a creare particelle sempre più grandi che, per aggregazione, formano particelle di dimensioni significative. Un esempio tipico è rappresentato dall'acido solforico, che funge da iniziatore della nucleazione insieme all'acqua e all'ammoniaca formando il Cluster che, a sua volta favorisce la formazione di particelle più grandi.

Una possibile suddivisione del particolato si basa sulla sua sorgente di emissione, avremo quindi:

- particolato di origine naturale
- particolato di origine antropica

Il primo comprende le polveri provenienti dall'erosione di roccia e suolo, spray marino, sostanze organiche e ceneri originatesi in seguito ad incendi boschivi o eruzioni vulcaniche. Il secondo invece deriva dalle attività umane, in particolare dall'uso di combustibili fossili e biomasse, all'usura ad esempio dei pneumatici e del manto stradale e a numerosi processi industriali. Il primo rappresenta circa il 94% del particolato totale ma è il secondo che rappresenta un vero rischio per la salute umana specialmente a causa della sua maggiore concentrazione nelle aree urbane.

In base alla sua origine il particolato può essere anche diviso in:

- particolato primario; emesso in atmosfera direttamente nella sua forma finale a partire da una sorgente nota. Può essere a sua volta suddiviso in filtrabile e condensabile, a seconda che venga emesso in fase gassosa o in forma di condensa a valle dello scarico in seguito alla diluizione
- particolato secondario; formatosi in seguito a reazioni chimiche e fotochimiche avvenute in atmosfera e che coinvolgono specie inquinanti quali  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  e composti organici (VOC). Un esempio tipico caratteristico di questa categoria è lo smog fotochimico

Per una quantificazione delle emissioni secondarie, un ruolo fondamentale viene rivestito dalla reattività degli inquinanti primari, specialmente degli NO<sub>x</sub>, in quanto negli strati più bassi dell'atmosfera rappresentano l'80% della conversione a particolato. Per una stima del PM<sub>10</sub> totale faremo riferimento alla formula di DE Leeuw:

$$PM_{10tot} = PM_{10primario} + NO_x * 0,88 + SO_2 * 0,54 + NH_3 * 0,63$$

Queste particelle possono essere campionate attraverso l'utilizzo di filtri con determinate dimensioni, analizzate ed identificate in base al loro massimo diametro aerodinamico equivalente ( $d_{ae}$ ), valore molto utile per la classificazione a causa della diversa densità e forma delle particelle, permette infatti di caratterizzare ed uniformare univocamente il comportamento aerodinamico di queste particelle. Tra i disturbi attribuiti al particolato fine ed ultrafine (PM<sub>10</sub> e PM<sub>2,5</sub>) compaiono patologie acute e croniche a carico dell'apparato respiratorio come asma, bronchiti, enfisemi, allergie, tumori e problemi cardio circolatori. Nel luglio del 2013 è arrivata la prima importante conferma della stretta relazione che intercorre fra inquinamento atmosferico e i tumori ai polmoni. Sulla rivista Lancet Oncology sono stati pubblicati i risultati di una ricerca sperimentale, eseguita su più di trecentomila persone residenti in 9 paesi dell'Unione Europea. È stato misurato l'inquinamento da polveri sottili nell'aria dovute principalmente all'utilizzo dei motori a scoppio, degli impianti di riscaldamento e delle attività industriali. È stato analizzato che per ogni incremento di 10 microgrammi di PM<sub>10</sub> per metro cubo, il rischio di tumore aumenta circa del 22%. E può salire fino al 51% per una particolare tipologia di tumore, l'adenocarcinoma, l'unico a svilupparsi in un significativo numero di non fumatori. È da precisare che il tumore al polmone rappresenta la prima causa di morte dei paesi industrializzati. Solamente in Italia, nel 2010, si sono registrati più di 31000 nuovi casi. La ricerca mostra che più è alta la concentrazione di inquinanti presenti nell'aria e maggiore è la percentuale di rischio di sviluppare un tumore al polmone.



## 1.5 Il problema del particolato

Se da una parte viene incentivato l'utilizzo della biomassa, perché considerata una fonte rinnovabile e per le basse emissioni di CO<sub>2</sub> che libera in atmosfera, dall'altra parte non vanno trascurate le politiche per limitare e/o eliminare la quantità consistente di particolato prodotto dalla sua combustione.

[1] Alcuni studi a livello nazionale e regionale hanno permesso di quantificare il contributo alle emissioni di particolato derivante dalla combustione di biomassa a uso domestico. Per quanto riguarda l'Emilia-Romagna, regione con un'intensa attività industriale e con una conformazione morfologica e condizioni metereologiche sfavorevoli per gli inquinanti, nel 2010 sono state emesse 13 000 tonnellate di PM<sub>10</sub>.

Se si considerano le diverse sorgenti di particolato, sempre per l'Emilia-Romagna, emerge che nel 2014 il 40% delle emissioni di particolato sotto i 10 µm è dovuto alla combustione non industriale (quindi al riscaldamento domestico di case o condomini), e di questa parte quasi la totalità (99%) deriva dalla combustione delle biomasse, mentre i trasporti producono il 34% del PM<sub>10</sub>. Oltre al valore percentuale maggiore, a peggiorare la situazione del riscaldamento domestico è il fatto che il particolato che esso produce viene rilasciato solo nei 4 mesi invernali, mentre i dati dei trasporti sono riferiti all'intero anno: ciò fa sì che la combustione delle biomasse sia la causa principale del superamento dei limiti dei livelli di particolato in atmosfera nei mesi più freddi.

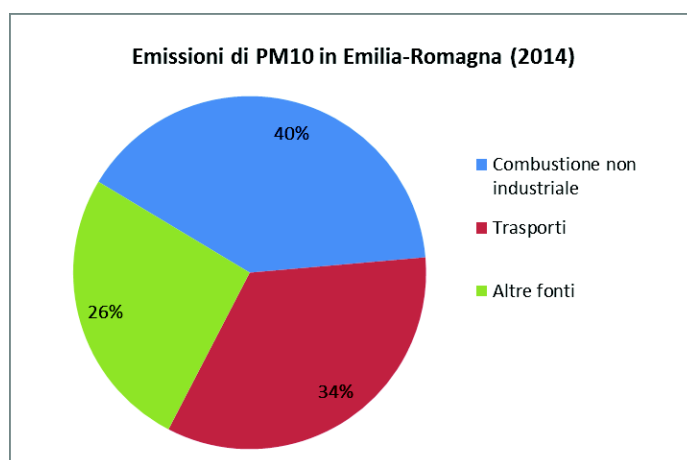


Figura 1. 2 Percentuali relative alle emissioni di PM10 nella Regione Emilia-Romagna nel 2014, suddivise per diverse fonti del particolato. Fonte: Arpa Emilia-Romagna

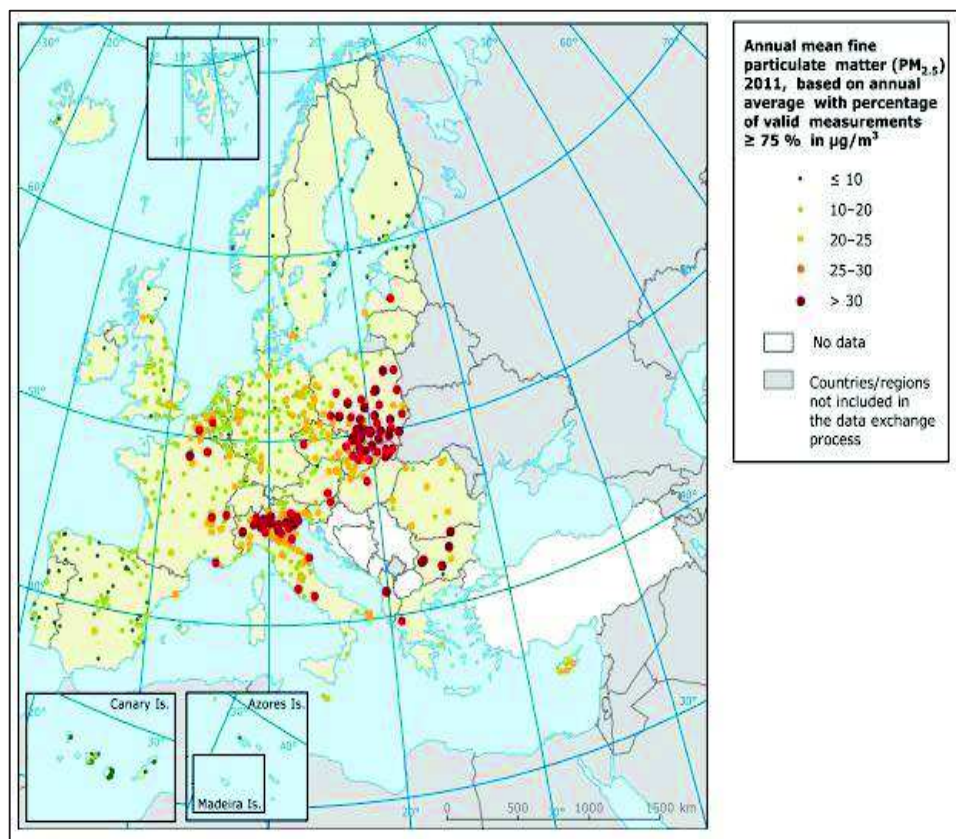
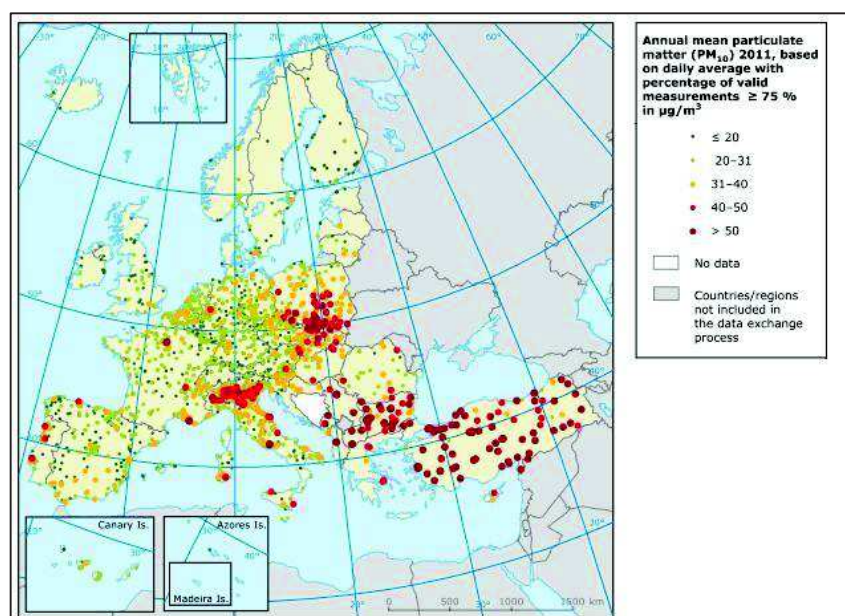


Figura 1. 3 Situazione delle città europee nel 2011 riguardanti le emissioni di  $PM_{2.5}$ ; i colori indicano i diversi range entro i quali sta il numero di superamenti del limite giornaliero delle emissioni nelle diverse zone. Fonte: EEA.



**Figura 1. 4 Situazione delle città europee nel 2011 riguardanti le emissioni di PM10: i colori indicano i diversi range entro i quali sta il numero di superamenti del limite giornaliero delle emissioni nelle diverse zone. Fonte: EEA**

[2] Anche a livello europeo il problema delle emissioni di particolato è piuttosto risentito. Dal 2000 al 2012, grazie alle politiche adottate, si è riscontrata in Europa una riduzione delle emissioni del particolato, PM10 e PM2,5, pari al 19%, nonostante questo però ancora molte città superano i limiti di emissione imposti dalla legge.

[3] Nel 2011 le regioni più critiche sono state la Polonia, l'Italia, la Slovacchia, la regione Balcanica e la Turchia per il PM10, mentre per il PM2,5 si aggiungono anche la Francia e la Repubblica Ceca.

[2] Anche in Europa la principale fonte di emissione del particolato rimane il riscaldamento civile che, nel 2012, ha contribuito per il 43% alle emissioni di PM10 (seguito da: 15% processi industriali, 13% trasporto stradale, 11% agricoltura, 7% produzione e distribuzione di energia, 7% uso energetico nell'industria). [4][5] Nei Paesi dell'EU-28 infatti, l'aumento dell'utilizzo di biomassa in applicazioni domestiche ha determinato, dal 2003 al 2012, una crescita del 13% e dell'11% nelle emissioni di PM10 e PM2,5 rispettivamente.

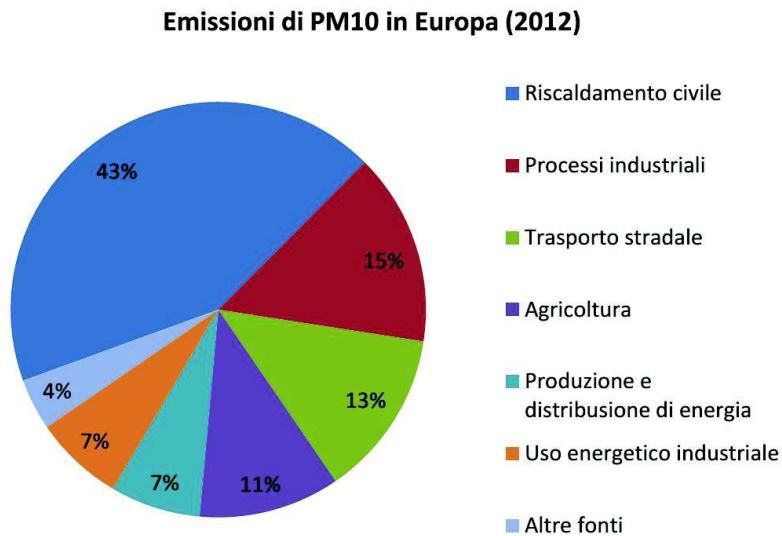


Figura 1. 5 Percentuali relative alle emissioni di PM10 in Europa, nel 2012, suddivise per diverse fonti del particolato. Fonte: EEA.

### 1.6 L'esigenza di un sistema di filtrazione del particolato derivante dalla combustione di biomassa

Quanto detto fino ad ora mostra i vantaggi dell'utilizzo della biomassa come combustibile, essendo questa una fonte rinnovabile, economica e producendo poca CO<sub>2</sub>. Questi aspetti giustificano l'incentivo a continuare ad utilizzare questo materiale come fonte di energia, ma allo stesso tempo vanno previste strategie per ridurre l'impatto negativo sulla qualità dell'aria, in termini di particolato.

Per prima cosa va ridotta la quantità di polveri emessa dalla combustione, agendo sull'efficienza degli impianti e garantendo una gestione e un controllo ottimali.

Non potendo eliminare completamente il particolato dall'effluente gassoso prodotto dalla biomassa, in secondo luogo è necessario agire a valle della combustione, realizzando la filtrazione delle particelle incombuste, così da rendere questa fonte rinnovabile effettivamente valida come alternativa ai combustibili fossili.

Si ha allora l'esigenza di progettare sistemi di filtraggio che riducano l'impatto ambientale della combustione di biomassa, mantenendo però a sua volta tutti i vantaggi dell'utilizzo di biomassa, soprattutto per quanto riguarda la convenienza economica.

### **1.7 Quadro normativo europeo ed italiano**

A livello europeo, la normativa Air Quality Directive 2008/50/EC stabilisce i limiti sulle emissioni del particolato valide per tutti i Paesi aderenti all'Unione Europea. In particolare per quanto riguarda il PM<sub>10</sub> in aria ambiente impone due limiti, uno a breve termine (24 ore, giornaliero) posto pari a 50 µg/m<sup>3</sup>, che può essere sfiorato non più di 35 volte all'anno, e uno a lungo termine (annuale) di 40 µg/m<sup>3</sup>, valore limite medio annuale.

Per il PM<sub>2.5</sub> in aria ambiente c'è solo un limite sul lungo termine pari a 20 µg/m<sup>3</sup> valore medio da non superare, calcolato relativamente ad un anno. Altri limiti relativi al PM<sub>2,5</sub> verranno imposti a breve e nel 2020.

<b>Dimensione della frazione</b>	<b>Periodo medio</b>	<b>Valore</b>	<b>Commenti</b>
Valore limite PM10	al giorno	50 µg/m <sup>3</sup>	Non deve essere superato per più di 35 giorni all'anno (dal 1 Gennaio 2005)
Valore limite PM10	all'anno	40 µg/m <sup>3</sup>	dal 1 Gennaio 2005
Valore target PM2,5	all'anno	25 µg/m <sup>3</sup>	dal 1 Gennaio 2010
Valore limite PM2,5	all'anno	25 µg/m <sup>3</sup>	dal 1 Gennaio 2015
Valore limite PM2,5 <sup>(a)</sup>	all'anno	20 µg/m <sup>3</sup>	dal 1 Gennaio 2020
Concentrazione di esposizione al PM2,5 <sup>(b)</sup>		20 µg/m <sup>3</sup>	2015
Target di riduzione di esposizione al PM2,5 <sup>(b)</sup>	0-20% di riduzione di esposizione (a seconda del valore medio dell'indicatore di esposizione nell'anno di riferimento). Dal 2020		

(a) Valore limite indicativo da rivedere dalla Commissione nel 2013 alla luce di ulteriori informazioni sulla salute e gli effetti sull'ambiente, fattibilità tecnica e esperienza del valore target nei Paesi Membri.

(b) Basato sulla media di tre anni.

**Tabella 1. 2 Valori limite e target sulle emissioni di PM10 e PM2,5 come imposto dalla normativa europea. Fonte: Air Quality Directive 2008/50/EC.**

Per quanto riguarda la legge italiana, i limiti sulle emissioni derivanti dalla combustione di biomassa sono definiti nel Decreto Legislativo n° 152 del 3 aprile del 2006 (allegato 1, parte III, punto 1.1 della parte V), in base alla potenza nominale dell'impianto. In particolare questo documento prescrive di rispettare livelli diversi di inquinanti a seconda si tratti di impianti a biomassa nuovi o installati prima del 2006 e autorizzati a partire dal 12 marzo 2002, oppure di impianti anteriori al 1998: in entrambi i casi i limiti tabulati e imposti dalla legge sono riferiti ad un tenore di ossigeno nel fumo pari all'11% (Tabelle 2.2 e 2.3).



	Potenza termica nominale installata (MW)			
	[1] >0,15 ÷ ≤3	>3 ÷ ≤6	>6 ÷ ≤20	>20
polveri totali	100 mg/Nm <sup>3</sup>	30 mg/Nm <sup>3</sup>	30 mg/Nm <sup>3</sup>	30 mg/Nm <sup>3</sup>
carbonio organico totale (COT)	-	-	30 mg/Nm <sup>3</sup>	20 mg/Nm <sup>3</sup> 10 mg/Nm <sup>3</sup> [2]
monossido di carbonio (CO)	350 mg/Nm <sup>3</sup>	300 mg/Nm <sup>3</sup>	250 mg/Nm <sup>3</sup>	200
			150 mg/Nm <sup>3</sup> [2]	100 mg/Nm <sup>3</sup> [2]
ossidi di azoto (espressi come NO <sub>2</sub> )	500 mg/Nm <sup>3</sup>	500 mg/Nm <sup>3</sup>	400 mg/Nm <sup>3</sup>	400 mg/Nm <sup>3</sup>
			300 mg/Nm <sup>3</sup> [2]	200 mg/Nm <sup>3</sup> [2]
ossidi di zolfo (espressi come SO <sub>2</sub> )	200 mg/Nm <sup>3</sup>	200 mg/Nm <sup>3</sup>	200 mg/Nm <sup>3</sup>	200 mg/Nm <sup>3</sup>
[1] Agli impianti di potenza termica nominale pari o superiore a 0.035 MW e non superiore a 0,15 MW si applica un valore di emissione per le polveri totali di 200				
[2] Valori medi giornalieri.				

Tabella 1. 3 Limiti sulle emissioni da combustione di biomassa per impianti nuovi o installati prima del 2006 e autorizzati dal 12 marzo 2012. Fonte: D. Lgs. 152/06 (allegato 1, parte III, punto 1.1 della parte V).

	Potenza termica nominale ≤5MW	Potenza termica nominale >5MW
polveri	100-150 mg/Nm <sup>3</sup>	50 mg/Nm <sup>3</sup>
COV	50 mg/Nm <sup>3</sup>	
ossidi di azoto	650 mg/Nm <sup>3</sup>	
ossidi di zolfo	600 mg/Nm <sup>3</sup> per gli impianti a letto fluido 2000 mg/Nm <sup>3</sup> per tutti gli altri impianti I valori di emissione per gli ossidi di zolfo si considerano rispettati se sono utilizzati combustibili con contenuto di zolfo uguale o inferiore all'1%.	
composti alogenati	Non si applica la parte II, paragrafo 3, tranne nel caso in cui il combustibile utilizzato sia legno o residui di legno contenente prodotti sintetici o sanse residue da estrazione	

Tabella 1. 4 Limiti sulle emissioni da combustione di biomassa per impianti installati prima del 1988.

Si può notare allora che, con particolare riferimento al particolato, mentre per impianti di grandi dimensioni di applicazione industriale (>3 MW), ci sono limiti precisi e piuttosto contenuti, per potenze comprese tra 35 e 150 kW, caratteristiche di sistemi

di riscaldamento residenziali come nel caso di condomini, i livelli di emissione concessi sono maggiori ( $200 \text{ mg/Nm}^3$  è il massimo valore concesso per le emissioni di polveri totali). Inoltre si vede che mancano completamente i limiti per impianti di piccola taglia, inferiore ai 35 kW, di utilizzo tipico per il riscaldamento domestico.

L'assenza di limiti, o di limiti più stringenti, per piccole potenze, rende questi impianti i più critici. Si è già detto che la combustione non industriale produce il 40% del particolato in Emilia-Romagna e che di questo valore il 99% deriva dalla biomassa: ciò è dovuto al fatto che i dispositivi utilizzati per applicazioni domestiche, per esempio per il riscaldamento, lavorano con rendimenti minori rispetto al caso industriale, non sono gestibili e regolabili in modo da ottenere le condizioni ottimali di funzionamento, e in più la biomassa utilizzata ha caratteristiche molto differenti, non sempre ideali per la combustione e a volte è anche di scarsa qualità. Tutto ciò contribuisce a livelli di particolato emessi da questi impianti molto alti, ma ad ora concessi dalla legge.

Tab. 1 Rendimento apparecchi	
TIPO APPARECCHIO	RENDIMENTO
Cucina economica	50%
Stufa tradizionale	50%
Stufa a olle	60%
Stufa a combustione controllata	70%
Stufa a pellet	80%
Camino chiuso	45%
Camino aperto	35%
Caldaia a pellet	90%
Caldaia a legna	85%
Caldaia a cippato	88%

**Tabella 1. 5 - Rendimenti di alcuni dispositivi per il riscaldamento domestico (combustione non industriale)**

[6] L'incremento dell'utilizzo di biomassa come combustibile ha determinato in Italia il superamento dei limiti imposti dalle norme comunitarie relativamente a particolato e biossido di azoto ( $\text{NO}_2$ ), soprattutto in alcune zone del territorio con morfologie e condizioni atmosferiche sfavorevoli, come il bacino padano (invece al Centro-Sud il



mancato rispetto dei valori emessi è localizzato in piccole aree). Ciò ha determinato contestazioni da parte dell'Unione Europea per il periodo dal 2005 al 2011, ma anche sanzioni per gli anni 2006 e 2007.

Al fine di risolvere i problemi relativi al superamento delle concentrazioni limite su tutto il territorio nazionale, il Ministero ha deciso di avviare una strategia condivisa per individuare misure da attuare.

Nel Dicembre 2013 è stato stipulato un accordo di programma tra i ministri dell'ambiente, dello sviluppo economico, delle infrastrutture e dei trasporti, delle politiche agricole e della salute per le regioni situate nella pianura padana caratterizzata da forte instabilità atmosferica: l'accordo prevede l'assunzione di impegni a breve, medio e lungo termine volti a contrastare l'inquinamento atmosferico, tramite la formazione di gruppi di lavoro per elaborare proposte normative condivise come l'aggiornamento dei limiti di emissione degli impianti a biomassa, l'introduzione di un sistema di certificazione ambientale delle caldaie domestiche, la riqualificazione energetica degli edifici.

Per quanto riguarda l'aggiornamento dei limiti imposti, è già stata avanzata da uno dei gruppi di lavoro una proposta di modifica del Decreto Legislativo 152/06 (precedentemente presentato) per la parte relativa agli impianti a biomassa: la richiesta di variazione dei valori soglia degli inquinanti da combustione di biomassa, suddivisa anche in questo caso in base alla potenza nominale installata, differisce per impianti installati dopo il 1° gennaio 2015 rispetto a quelli installati precedentemente a questa data.

Comunque anche la proposta di modifica della normativa mantiene più alti i limiti di emissione di polveri totali per impianti di potenza tra i 35 e i 150 kW e lascia scoperta la fascia di sistemi di piccola taglia.

POTENZA TERMICA NOMINALE INSTALLATA (MW)				
	>0,15 ÷ ≤1	>1 ÷ ≤5	>5 ÷ ≤20	>20
polveri [1]	50 mg/Nm <sup>3</sup>	30 mg/Nm <sup>3</sup>	20 mg/Nm <sup>3</sup>	20 mg/Nm <sup>3</sup>
carbonio organico totale (COT)	-	-	30 mg/Nm <sup>3</sup>	20 mg/Nm <sup>3</sup>
monossido di carbonio (CO)	300 mg/Nm <sup>3</sup>	300 mg/Nm <sup>3</sup>	200 mg/Nm <sup>3</sup>	200 mg/Nm <sup>3</sup>
ammoniaca (NH <sub>3</sub> ) [2]	5 mg/Nm <sup>3</sup>	5 mg/Nm <sup>3</sup>	5 mg/Nm <sup>3</sup>	5 mg/Nm <sup>3</sup>
ossidi di azoto (NO <sub>2</sub> )	300 mg/Nm <sup>3</sup>	300 mg/Nm <sup>3</sup>	200 mg/Nm <sup>3</sup>	200 mg/Nm <sup>3</sup>
ossidi di zolfo (SO <sub>2</sub> )	150 mg/Nm <sup>3</sup>	150 mg/Nm <sup>3</sup>	150 mg/Nm <sup>3</sup>	150 mg/Nm <sup>3</sup>

*[1] Agli impianti di potenza termica nominale compresa tra 0,035 MW e 0,15 MW si applica un valore di emissione per le polveri totali di 100 mg/Nm<sup>3</sup>.*

*[2] si applica nel caso siano adottati impianti di abbattimento per gli ossidi di azoto con urea o ammoniaca.*

Tabella 1. 6 - Proposta di modifica dei limiti sulle emissioni da combustione di biomassa per impianti installati prima del 1° gennaio 2015. Fonte: Energia e Dintorni – settembre 2014



## *2. Sistemi di filtrazione*

Nella prima parte di questo capitolo si vogliono illustrare i principali sistemi di pulizia dei fumi oggi utilizzati. Una prima grande distinzione riguarda l'apporto di un liquido per operare la cattura degli inquinanti, nel caso non si ricorra ad alcun liquido si parla di rimozione a secco, in caso contrario di rimozione ad umido. Per entrambe le tipologie di dispositivi verranno presentati i principali sistemi di rimozione disponibili sul mercato per applicazioni industriali.

Nella seconda parte del capitolo si entrerà più nello specifico illustrando i meccanismi di cattura del particolato che sono alla base dei dispositivi stessi.

### **2.1 SISTEMI DI RIMOZIONE A SECCO**

#### 2.1.1 Camera di sedimentazione

La sedimentazione gravitazionale è forse il mezzo più evidente di separare particelle da un flusso di gas che scorre. Una camera di sedimentazione è, in linea di principio, semplicemente una grande scatola attraverso la quale scorre la corrente di gas sporchi e in cui le particelle nel flusso depositano sul pavimento per gravità. La velocità del gas attraverso una camera di decantazione devono essere mantenuti sufficientemente bassa affinché le particelle di decantazione non sono ri-trascinate; pertanto la velocità del gas è generalmente ridotta allargando il condotto di ingresso alla camera in modo che risultino velocità sufficientemente ridotte.

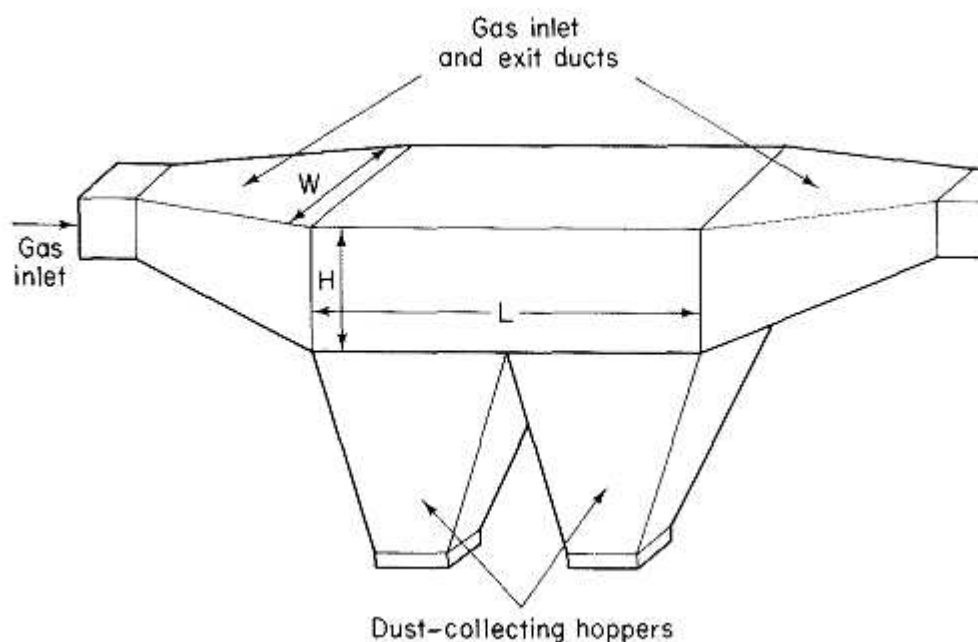


Figura 2.6 Rappresentazione semplificata di una camera a sedimentazione

Semplificando una camera di sedimentazione orizzontale a semplice gravità; consiste in un lungo condotto (dalle dimensioni  $L$  lunghezza,  $W$ : larghezza e  $H$ : altezza) sotto di cui sono collocate le tramogge.

La parte primaria della camera è caratterizzata dall'area della sezione trasversale ( $W \times H$ ) e dalla sua lunghezza ( $L$ ). L'area di sezione trasversale è progettata per essere più grande della entrata e uscire condotti in modo da ridurre sostanzialmente la velocità di ingresso della corrente gassosa. La lunghezza della camera determinate per quanto tempo le particelle rimangono rallentate, consentendo così il tempo necessario affinché le particelle si depositino nelle tramogge.

Uno dei parametri più importanti per il dimensionamento è la velocità del flusso di gas per evitare il re-trascinamento del particolato depositato; in linea di principio tale velocità è inferiore a 300 cm/sec, questo valore soddisfacente per la maggior parte dei materiali tuttavia alcune particelle a bassa densità sono ri-trascinate a velocità inferiori.

L'efficienza di separazione è normalmente rappresentabile con una curva di efficienza teorica per una camera di date dimensioni. Naturalmente la curva sotto riportata è solo indicativa e si possono ottenere curve differenti in funzioni delle scelte dimensionali fatte in fase di progetto cui corrisponderanno differenti curve

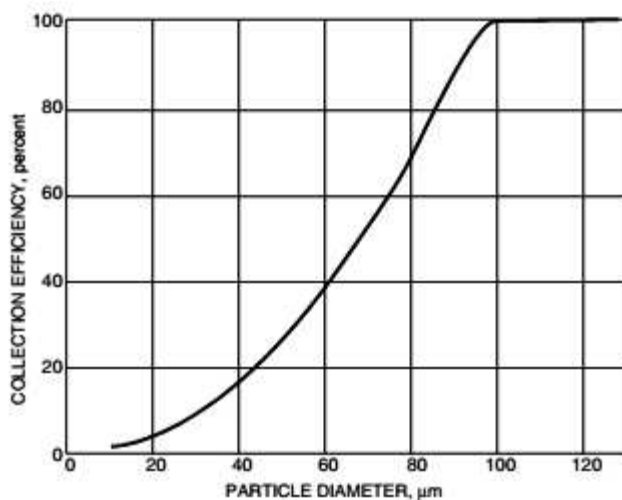


Figura 2. 7 Efficienza di cattura generica [48]

Come notato, camere di sedimentazione sono utilizzati per controllare le polveri sottili (PM), e principalmente PM superiore a 10  $\mu\text{m}$  (micron); ma in ultima analisi la maggior parte dei progetti mirano a raccogliere efficacemente solo le  $\text{PM} > 50 \mu\text{m}$ : in media l'efficienza di cattura per particelle  $\text{PM}_{10}$  è inferiore al 10%:

Così le camere di decantazione sono normalmente sono utilizzate come pre-filtri per rimuovere le particelle più grandi ed eventualmente abrasive particelle, prima di passare il flusso di gas attraverso altri dispositivi di raccolta.

Una camera di sedimentazione è, come già detto, semplicemente una camera orizzontale attraverso cui il gas di particelle cariche fluisce ed al piano di cui le particelle si depositano; ma la camera può contenere un numero di piastre orizzontali relativamente ravvicinate in modo che la distanza che una particella deve percorrere per essere raccolta è considerevolmente inferiore rispetto all'altezza del dispositivo nel suo complesso.

Le camere di sedimentazione offrono i vantaggi di:

- semplice realizzazione da cui bassi costi di realizzazione
- bassi costi di manutenzione
- ridotte perdite di carico
- raccolta di particelle senza bisogno di acqua (raccolta e smaltimento a secco)

- costo energetico molto basso (non sono previste parti in movimento o contributi elettrici)
- Bassi costi di manutenzione di costi di gestione
- Eccellente affidabilità
- Il dispositivo non soggetto ad abrasione a causa della bassa velocità del gas
- raffreddamento incidentale del flusso dei gas
- limiti di temperatura e pressione sono dipendenti solo dai materiali di costruzione (possono operare fino a 540°C)

Svantaggi includono invece:

- efficienze relativamente bassi PM di raccolta, in particolare per PM inferiore a 50  $\mu\text{m}$  di dimensione
- Non è possibile gestire materiali appiccicosi
- Sono caratterizzate da un forte ingombro
- I piatti all'interno delle camere a sedimentazione multipla possono deformarsi se si lavora ad alta temperatura

### 2.1.2 Cicloni

I cicloni sono dispositivi di depurazione dei gas che utilizzano la forza centrifuga creata da una corrente di gas rotante per separare particelle da un gas.

Il flusso di gas è costretto a seguire la geometria curva del ciclone mentre l'inerzia delle particelle nel flusso tende a muoverle verso la parete esterna, dove si scontrano e sono raccolti. Una particella di massa  $m_p$  si sposta in un percorso circolare di raggio  $r$ , con una velocità tangenziale  $v_\theta$  pertanto sulla particella agisce una forza centrifuga pari a  $m_p \cdot v_\theta / r$ . Ad un valore tipico di  $v_\theta = 10 \text{ m/s}$ ,  $r = 0,5 \text{ m}$ , questa forza è 20.4 volte quella di gravità sulla stessa particella. In tal maniera si può comprendere l'aumento della forza che agisce sulla particella in un ciclone rispetto alla semplice sedimentazione.

Successivamente in basso si ha un corpo tronco-conico dove perciò la sezione di passaggio si restringe, il flusso aumenta di velocità e le particelle impattano contro la

parete perdendo energia cinetica e discendendo per la forza di gravità. A circa metà della parte tronco-conica il flusso si restringe tanto da invertirsi e iniziare a salire verso l'alto. Le particelle più fini sfuggiranno alla forza centrifuga e seguiranno la corrente incanalandosi in un altro tubo, concentrico al cilindro più grande, ma con un raggio più piccolo, mentre quelle più pesanti scenderanno per essere poi raccolte.

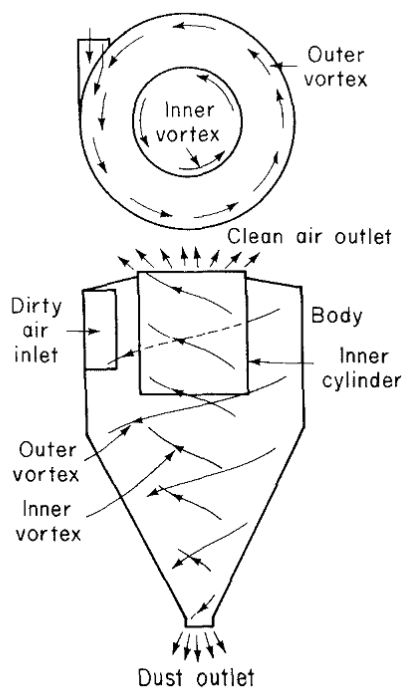


Figura 2. 8 Schematizzazione di un ciclone ad ingresso tangenziale ed uscita assiale

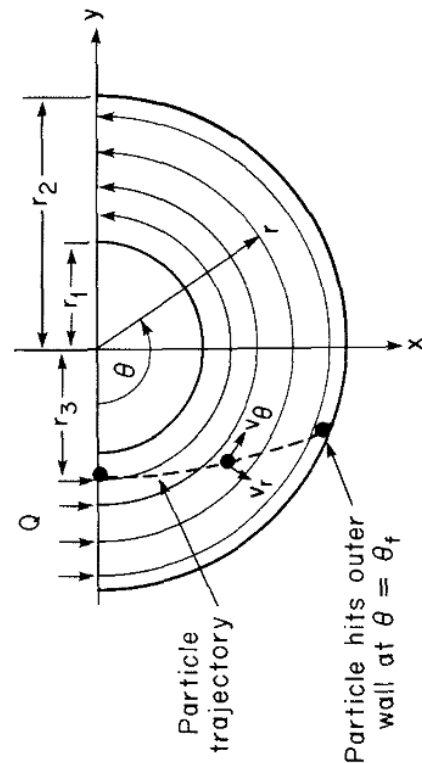


Figura 2. 9 Traiettoria ideale di una particella in una mezza rotazione del ciclone

In un ciclone le particelle nel flusso di gas rotante si spostano progressivamente verso la parete esterna mentre si spostano nel dispositivo. Come mostrato Figura 2. 8, il flusso di gas può eseguire più giri completi passando da una parte del dispositivo all'altra per poi uscire pulito dalla parte superiore.



Cicloni possono essere costruiti in qualsiasi materiale, metallo o ceramica, per esempio, che è in grado di resistere alle alte temperature, particelle abrasive, o ambienti corrosivi. È necessario che la superficie interna sia liscia in modo che le particelle raccolte possano scorrere facilmente lungo la parete fino alla tramoggia.

Il loro basso costo di realizzazione ed essendo esenti da manutenzione in fase di funzionamento li rendono ideali per l'uso come pre-filtri per dispositivi di filtrazione maggiormente efficienti posti a valle, come i filtri elettrostatici. Anche se cicloni sono stati tradizionalmente considerati come caratterizzati da una bassa efficienza, alcuni cicloni attualmente reperibili sul mercato possono raggiungere efficienze superiori al 98% per particelle maggiori di 5 $\mu$ m. Generalmente, cicloni normalmente disponibili possono raggiungere efficienze del 90% per particelle più grandi di 15 o 20  $\mu$ m.

I vantaggi di cicloni includono:

- Basso costo del capitale
- Nessuna parte in movimento; di conseguenza, manutenzione ridotta e bassi costi di gestione
- Caduta di pressione relativamente bassa (5 a 15 mbar), rispetto alla quantità di PM rimosso
- Limiti di temperatura e pressione sono dipende solo i materiali di costruzione
- Raccolta e smaltimento Dry
- Requisiti di spazio relativamente piccoli

Svantaggi di cicloni includono:

- efficienze relativamente bassi PM di raccolta, in particolare per PM inferiore a 10  $\mu$ m di dimensione
- Non è possibile gestire materiali appiccicosi
- Nelle unità ad alta efficienza si possono presentare gocce ad alta pressione

Utilizzando più cicloni in serie risultano in efficienze superiori, ma con un significativo aumento delle perdite di carico generate; questo si traduce in maggiori consumi energetici e di funzionamento.

### 2.1.3 Filtri a maniche

È costituito da un tessuto o un panno, realizzato da fitte fibre speciali cucite similmente in forma cilindrica (da cui la denominazione “filtro a maniche”) della lunghezza che varia dai 6 ai 9 m e con un diametro di circa 13 cm; differenti di questi filtri sono inseriti in una costruzione chiusa attraverso cui passa il gas di scarico. Il tessuto raccoglie la polvere al suo esterno e lascia filtrare dall'interno il gas pulito. Normalmente un filtro a maniche presenta al suo interno più maniche in modo da garantire le condizioni adeguate in funzione della portata di gas da filtrare e della quantità e tipo di particolato da intercettare.

Il processo di filtrazione tessuto consiste di tre fasi.

- 1) Innanzitutto, le particelle vengono raccolte dalle singole fibre.
- 2) Poi una fase intermedia le particelle si accumulano sulle particelle precedentemente raccolte, colmando le fibre.
- 3) Le particelle raccolte formano un cake, ovvero uno strato di polvere addensato sul tessuto, che agisce come filtro impaccato per le particelle incidenti. Poiché lo strato di polvere si accumula, la caduta di pressione attraverso il filtro aumenta, e periodicamente lo strato di polvere, deve essere staccato dal tessuto e raccolto nella tramoggia per rigenerare la manica in tessuto.

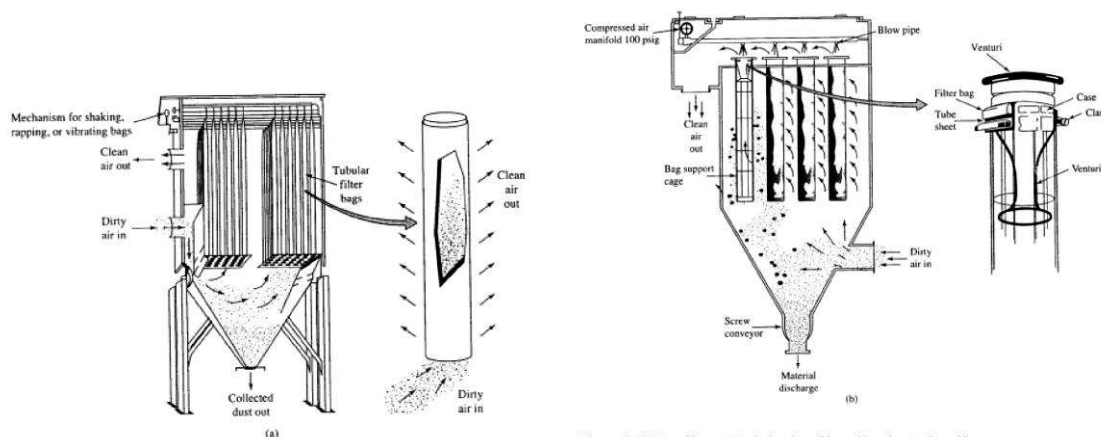


Figura 2. 10 Filtri a maniche [51]

L'efficienza di separazione dei filtri a maniche è molto elevato, anche con alte portate dei gas di scarico e ad alto contenuto di particelle.

Questa apparecchiatura è utilizzata per la cattura del particolato, compreso il particolato con diametro aerodinamico inferiore o uguale a 10  $\mu\text{m}$  (PM10) e perfino il particolato inferiore o uguale a 2,5  $\mu\text{m}$  di diametro aerodinamico (PM2.5).

Le efficienze tipiche per le nuove soluzioni progettate variano tra il 99 e 99,9%; i sistemi precedentemente esistenti lavorano nel range di efficienza effettiva di 95-99,9%.

L'efficienza di raccolta dei filtri a maniche dipende da diversi fattori: questi includono la velocità di filtrazione, le caratteristiche delle particelle, caratteristiche del tessuto, e il meccanismo di pulizia. In generale, l'efficienza di raccolta aumenta con l'aumentare della velocità di filtrazione e la dimensione delle particelle.

La temperatura dei gas a cui possono lavorare continuativamente è di circa 260 °C, con picchi a circa 290 °C; per abbattere le temperature si possono usare dispositivi di raffreddamento a spruzzo

o aria di diluizione. Nell'abbassare la temperatura bisogna assicurarsi di rimanere sempre sopra al punto di rugiada di qualsiasi condensabile nel flusso, nel caso si verifichi la formazione di condensa i filtri e la canalizzazione devono essere isolati e possibilmente riscaldati [47].

L'applicazione pratica di filtri in tessuto richiede l'uso di una grande area di tessuto al fine di evitare una caduta di pressione inaccettabile attraverso il tessuto. Le dimensioni per una particolare unità è determinata dalla scelta del rapporto aria-tessuto, o il rapporto del flusso volumetrico all'area panno. La selezione del rapporto aria-cloth dipende dal carico di particolato e caratteristiche, e il metodo di pulizia utilizzata. Un elevato carico di particolato richiede l'impiego di un filtro a maniche grande per evitare la formazione troppo pesante una torta di polvere, che porterebbe a una caduta di pressione eccessiva. Come esempio, un filtro a maniche per una caldaia di utilità 250 MW può avere 5000 sacchetti separati con una superficie totale tessuto avvicina 46.500 m<sup>2</sup> (500.000 piedi quadrati).

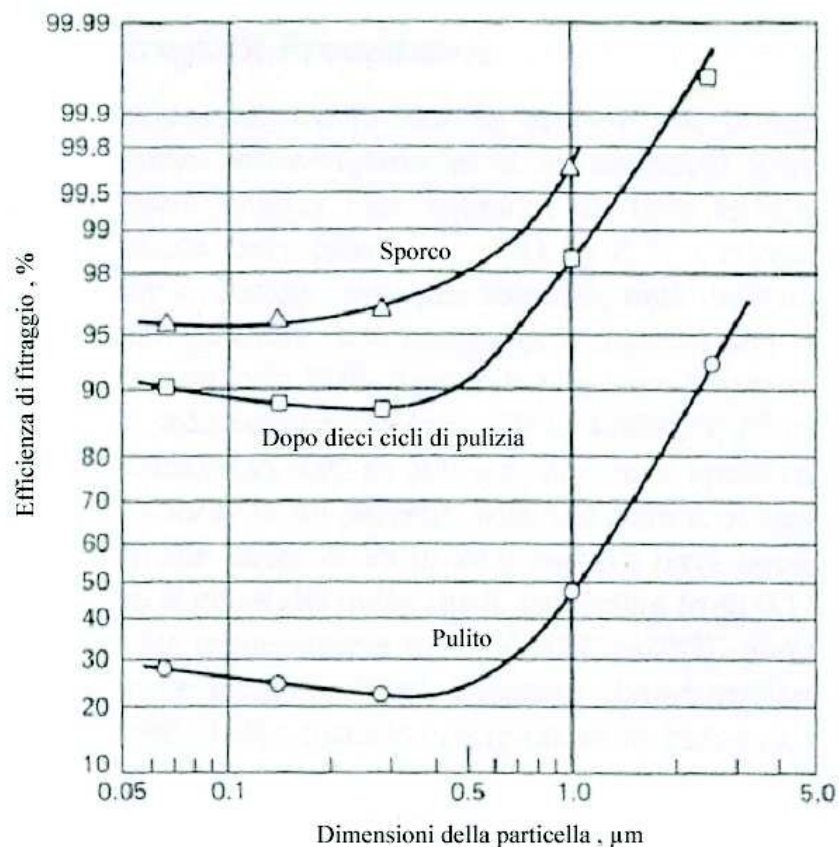


Figura 2. 11 Efficienza di cattura in funzione delle particelle dello stato del media filtrante

La pulizia mediante iniezione di aria compressa è relativamente recente. Le borse sono chiuse nella parte inferiore, aperte superiormente e sostenute da fermi interni, chiamati gabbie. Il gas carico di particolato fluisce nel sacchetto, con diffusori spesso utilizzati per evitare che particelle di grandi dimensioni danneggino i sacchetti. Il gas carico di polvere fluisce dall'esterno verso l'interno dei sacchi, e quindi il gas di scarico. Le particelle sono raccolte all'esterno delle borse e cadono in una tramoggia sottostante i filtri a maniche.

I filtri a maniche offrono i seguenti vantaggi:

- Si possono raggiungere efficienze di filtrazione molto elevate di raccolta sia per le particelle più grossolane che per le particelle molto fine (submicroniche);
- Possono essere utilizzati per un'ampia varietà di particelle
- Possono operare in un ampio intervallo di portate volumetriche;
- Sono insensibili alle variazioni nelle condizioni del flusso di gas

- L'efficienza e le perdite di carico sono insensibili alla variazione del quantitativo di polvere in ingresso perché i filtri sono costantemente puliti
- L'aria in uscita del filtro è molto pulita e può essere fatta ricircolare all'interno dell'impianto in molti casi (risparmio energetico).
- Il materiale raccolto è secco per la successiva elaborazione o smaltimento.
- Corrosione e ruggine dei componenti di solito non sono problemi.
- Il funzionamento è relativamente semplice.
- Non richiedono l'uso di alta tensione; di conseguenza, la manutenzione è semplificata e polveri infiammabili possono essere raccolte con la cura adeguata.

Le limitazioni dei filtri a manica sono:

- Deve operare a temperature inferiori a quella alla quale il tessuto viene distrutto, oppure la sua durata è ridotto a un grado antieconomico;
- Componenti dei gas o particelle che attaccano il tessuto o impediscono una corretta pulizia, quali particelle adesive difficili da rimuovere, sono da evitare;
- I filtri a maniche richiedono vaste superfici.
- Fumi con temperature superiori a 290°C richiedono particolare minerale refrattario o tessuti metallici, che può essere costoso.
- Alcune polveri possono richiedere trattamenti dei tessuti per ridurre infiltrazioni di polvere o in altri casi, assistenza nella rimozione della polvere raccolta.
- La concentrazione di alcune polveri nel collettore, di circa 50 g / m<sup>3</sup>, può rappresentare un pericolo di incendio o esplosione se una scintilla o una fiamma se si presentano accidentalmente (rischio di esplosione delle polveri).
- I tessuti possono bruciare se facilmente ossidabili dalla polvere raccolta.
- I filtri a tessuto hanno requisiti di manutenzione relativamente elevati (es sostituzione periodica delle maniche)
- La vita del tessuto potrebbe accorciarsi lavorando a temperatura elevate, in presenza di particolato acido od alcalino
- Non possono essere utilizzati in ambienti umidi.
- I Materiali igroscopici, la condensa dell'umidità, o di componenti adesivi catramosi possono causare agglomerati

- È necessaria una perdita di carico media, tipicamente nell'intervallo di 10 a 25 cm di colonna d'acqua

Nonostante tutto i vantaggi di filtri a manica tessuto superano i loro limiti e rappresentano attualmente quasi il 50% del mercato dedicato alla pulizia industriale di effluenti gassosi [46].

#### **2.1.4 Precipitatori elettrostatici**

[49] I precipitatori elettrostatici (o ESP, dall'inglese Electro Static Precipitator) sono fra i dispositivi di controllo del particolato più utilizzati, con dimensioni che variano da quelli installati per la pulizia dei gas di scarico dei grandi impianti a quelli utilizzati come purificatori d'aria piccoli elettrodomestici.

Il principio alla base dei precipitatori elettrostatici è relativamente semplice, se un gas viene fatto passare attraverso un elettrodo posto ad elevato potenziale e un altro posto a terra, esso si ionizza dando luogo all'effetto corona. Gli ioni prodotti vanno a depositarsi sulle particelle di polvere, tar e acqua che quindi diventano carichi e a causa del campo elettrico presente tenderanno a muoversi e a depositarsi sull'elettrodo di raccolta posto a terra. Le particelle aderiscono alla parete dell'elettrodo formando uno strato che è tenuto insieme da una combinazione di forze di Van der Waals e di attrazione elettrica; periodicamente lo strato di particelle deve essere rimosso.

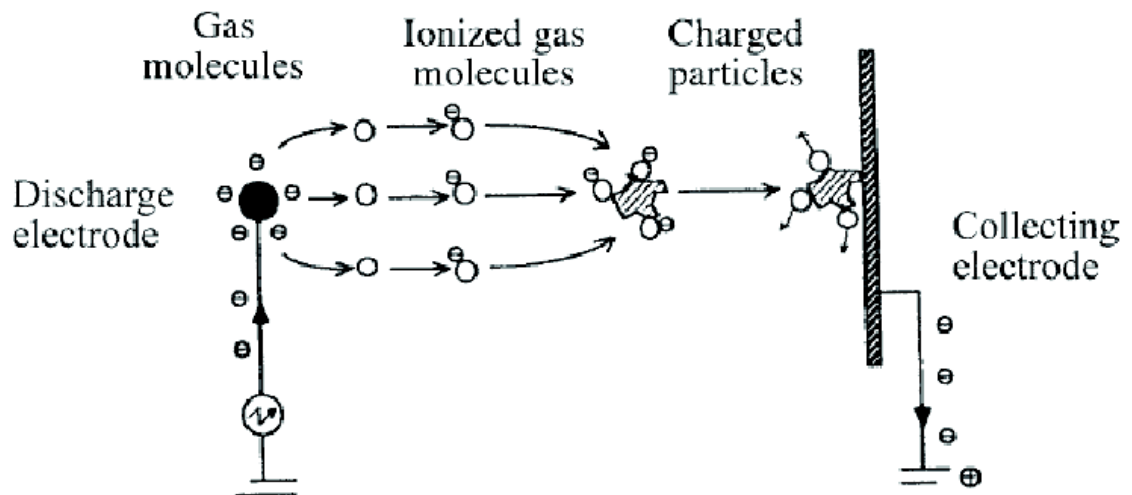


Figura 2. 12 Meccanismo di funzionamento di un precipitatore elettrostatico, [49]

Ci sono due tipi di configurazioni possibili per la realizzazione di queste operazioni, a singolo stadio e a doppio stadio:

1) La prima è la più utilizzata e prevede che la ionizzazione del gas, la carica delle particelle e la loro raccolta avvenga in una sola fase. In questo caso i precipitatori elettrostatici possono essere di due tipi:

- a) In un tipo gli elettrodi di raccolta sono formati da una serie di piastre in parallelo nel mezzo delle quali sono posti dei fili che funzionano da elettrodi di scarica (Figura 2. 10).
- b) L'altro tipo differisce dal primo in quanto gli elettrodi di raccolta sono a forma di tubo al centro del quale è posto l'altro elettrodo.

Con le apparecchiature di tipo tubolare si ha un aumento dell'efficienza di separazione in quanto la distribuzione del campo elettrico all'interno è più uniforme, di contro si hanno costi di acquisto e di installazione maggiori perché soltanto la parte interna del tubo funziona da elettrodo di raccolta mentre nel caso dei precipitatori a piastre tutte e due i lati delle piastre sono utilizzati.

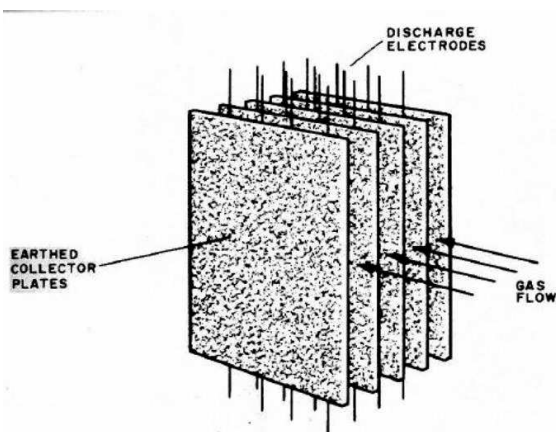


Figura 2. 13 Precipitatore elettrostatico a piastre. (Air Pollution Control Engineering, 2004)

2) La configurazione a doppio stadio divide la fase di carica delle particelle da quella di raccolta delle stesse. L'apparecchiatura è formata da una zona in cui sono posti gli elettrodi di scarica nella quale avviene la carica delle particelle poi, il gas con le particelle cariche sono inviati al secondo stadio dove sono posti tutti gli elettrodi di raccolta.

Il passaggio di corrente attraverso un flusso gassoso avviene solo se il gas è ionizzato da una forza esterna. Tale forza in questo caso è l'applicazione di un'elevata differenza di potenziale ai capi dei due elettrodi. La differenza di potenziale innesca un effetto corona: il campo elettrico nelle vicinanze dell'elettrodo, che ha la forma di un filo, diviene talmente alto che si ottiene un'eccitazione di tutti gli elettroni presenti in questa zona. Gli elettroni a loro volta si legano alle molecole di gas che attraversano l'apparecchiatura e formano ioni negativi. L'esistenza di un gas fortemente ionizzato in prossimità del cavo elettrico è evidenziata da una corona di colore blu. Nei precipitatori elettrostatici industriali si preferisce utilizzare un elettrodo a carica negativa piuttosto che a carica positiva. Nella configurazione ad elettrodo negativo si ottiene una corrente maggiore per una data tensione e inoltre la tensione massima applicabile, prima che si abbia scarica completa attraverso il gas, è maggiore. Nel caso di elettrodo positivo la corona che si viene a formare è

instabile e disuniforme sul filo. Elettrodi positivi vengono utilizzati per applicazioni domestiche perché producono meno ozono. Dopo la fase di ionizzazione del gas, si passa a quella di carica delle particelle. Tale processo avviene con due metodi diversi a



La precipitazione elettrostatica differisce dai metodi meccanici di separazione delle particelle nei quali la forza esterna è applicata direttamente alle singole particelle piuttosto che indirettamente attraverso forze applicate l'intero flusso di gas (ad esempio, in un separatore a ciclone). Le particelle si raccolgono sull'elettrodo:

- se le particelle raccolte sono liquide, il liquido fluisce giù l'elettrodo per gravità e viene rimosso nella parte inferiore del dispositivo.
- Se le particelle sono solide, lo strato raccolto sull'elettrodo viene rimosso periodicamente colpendo l'elettrodo.

I separatori elettrostatici in generale, considerando che agiscono solo sul particolato e solo in minima parte ostacolano il flusso dei gas di scarico, hanno minime perdite di carico (in genere inferiori a 130 Pa). Come risultato, i requisiti di energia e costi operativi tendono ad essere ridotti. Raggiungono un'efficienza di filtrazione elevata, anche per particelle molto piccole. Essi possono essere progettati per una vasta gamma di temperature dei gas e lavorare fino a temperature elevate (700°C). La raccolta e lo smaltimento a secco ne aumenta la praticità. I costi operativi sono relativamente bassi. ESP sono in grado di operare ad alta pressione (a 1,030 kPa) o in condizioni di vuoto. Si possono trattare efficacemente grandi portate di effluenti gassosi.

Hanno in generale elevati costi fissi. Gli elettrodi di scarica Wire (circa 2,5 mm [0,01 in.] di diametro) sono oggetti di alta manutenzione. La corrosione può verificarsi nella parte superiore dei fili a causa di vuoti d'aria e condensa acida.

Questa tecnologia ma si presta ad essere impiegata in processi che sono altamente variabili perché sono molto sensibili alle fluttuazioni delle condizioni del flusso di gas (portate, temperature, particolato e composizione del gas e carichi di particolato).

ESP sono anche difficili da installare in siti che hanno limitato lo spazio, dal momento che gli ESP deve essere relativamente grandi per ottenere le velocità basse del gas necessari per la raccolta efficiente del particolato. Alcune particelle sono difficili da raccogliere a causa della loro resistività (è l'attitudine di un materiale ad opporre resistenza al passaggio delle cariche elettriche) estremamente alta o bassa. Non ci può essere un rischio di esplosione nel trattamento di gas combustibili o la raccolta del particolato combustibili. È necessario personale per la manutenzione qualificato. Inoltre questo sistema non è raccomandato per la rimozione di particelle appiccicose.

## **2.2. SISTEMI DI RIMOZIONE A UMIDO**

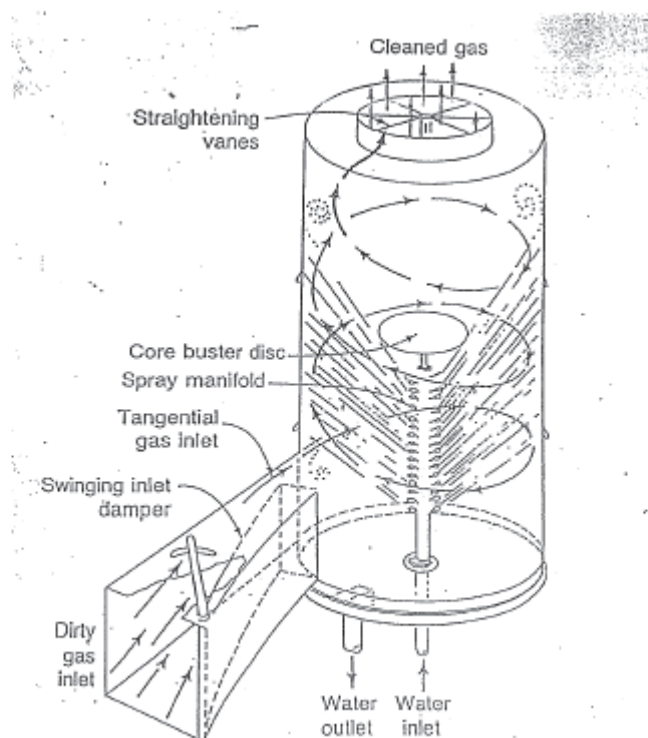
### **2.2.1 Precipitatori elettrostatici ad umido**

I precipitatori elettrostatici ad umido non sono certamente una novità in campo industriale, basti pensare che ormai sono disponibili sul mercato da quasi 100 anni. Essi sono stati però sempre confinati ad applicazioni di nicchia in piccole industrie, mentre è solo negli ultimi 20 anni che la loro applicazione sta interessando anche le grandi industrie, specialmente metallurgiche, e le centrali per la produzione di energia elettrica alimentate a carbone o Orimulsion (un derivato del petrolio). Il principio di funzionamento dei precipitatori elettrostatici ad umido è lo stesso di quelli a secco. L'unica differenza, come già accennato, è sul sistema di rimozione delle polveri e goccioline dall'elettrodo. I sistemi ad umido sono particolarmente indicati nel caso in cui sia necessario rimuovere anche particelle liquide insieme al solido e quando il flusso gassoso entrante presenti un alto tasso di umidità. Vengono utilizzati soprattutto nel caso di fumi uscenti da caldaie e da inceneritori di rifiuti per rimuovere il tar, le particelle di acido solforico e le ceneri volanti che hanno un basso valore di resistività e quindi sono difficilmente separabili nei precipitatori a secco. Molto importante in questo tipo di apparecchiature è il metodo di irrigazione della superficie dell'elettrodo. Quando il gas è particolarmente umido, le sue stesse goccioline vanno a formare un film di liquido sulla superficie dell'elettrodo di raccolta. Un altro metodo di auto irrigazione può verificarsi per condensazione dell'umidità presente nel gas sulla superficie dell'elettrodo, per aiutare la condensazione al di fuori del tubo o della piastra di raccolta si fa circolare dell'aria fredda. I precipitatori ad umido risolvono alcuni dei problemi delle apparecchiature a secco. Quando lo strato di particelle viene rimosso dall'elettrodo con un getto d'acqua non si ha il rischio che il gas si riprenda una parte delle polveri. Se il flusso di acqua sulla superficie dell'elettrodo è continuo non si ha il problema del valore della resistività delle polveri ed inoltre nel caso di flusso gassoso irregolare o turbolento non sussiste il rischio dell'erosione dello strato di particelle. L'utilizzo di precipitatori ad umido presenta però alcuni svantaggi. Non è possibile operare ad alte temperature, il limite è la temperatura di ebollizione dell'acqua, le apparecchiature a secco possono invece funzionare con temperature

relativamente (circa 650°C). Si possono verificare problemi di corrosione sulle superfici metalliche degli elettrodi a causa della presenza di acqua e quindi questi devono essere progettati in materiali che resistono alla corrosione che sono generalmente più costosi. Rispetto ai precipitatori a secco, queste apparecchiature raccolgono nelle tramogge di scarico uno liquame (slurry) composto dalle polveri, dalle goccioline di liquido e dall'acqua di raccolta. Questa miscela di acqua e particolato deve essere trattata prima di poter essere inviata in discarica, costituendo un costo aggiuntivo. Rispetto alle altre apparecchiature ad umido, usate per purificare i gas di scarico dal particolato solido e dalle goccioline di liquido, come gli scrubber Venturi, i precipitatori elettrostatici ad umido hanno un'efficienza di separazione maggiore in quanto hanno un'efficienza di separazione delle particelle submicroniche maggiore. Inoltre i consumi di energia sono più bassi. Nel grafico in Figura 2. 11 è riportato l'efficienza di rimozione delle particelle in funzione del loro diametro, si nota che i precipitatori elettrostatici presentano il valore di efficienza più alto soprattutto per particelle piccole, anche i filtri a manica hanno efficienze elevate ma non possono essere utilizzati anche per la separazione degli aerosol.

### 2.2.2 Cicloni a umido

Sono sistemi che riprendono essenzialmente gli aspetti funzionali dei cicloni descritti in 3.5.3.: l'aria da depurare viene immessa tangenzialmente in un corpo cilindrico a velocità nell'intorno dei 15 m/s, in modo da creare un moto vorticoso nel gas che eserciti delle forze centrifughe sulle particelle solide, le quali vanno così ad impattare contro le pareti del ciclone e finiscano nella tramoggia di raccolta. In questo caso però è prevista anche l'introduzione di acqua atomizzata per il lavaggio del gas (Figura 2. 15).



**Figura 2. 15 Schema di funzionamento di un ciclone ad umido**

Vengono spesso usati per rimuovere gocce di liquido in una corrente gassosa, in questo caso si raggiungono efficienze del 100% per gocce di diametro  $> 100 \mu\text{m}$ , ed efficienze tra il 95 ed il 99% per gocce di  $5 \div 50 \mu\text{m}$  di diametro; quando vengono usati per la separazione gas-solido i fumi vengono lavati con iniezione di liquido. In questo modo aumenta l'efficienza di filtrazione, in quanto diminuisce la quantità di particolato trascinata nel condotto di scarico. Risultano contenuti anche i fenomeni di erosione e formazione di depositi, con il conseguente aumento della vita utile dell'apparato. Le portate di acqua richieste si aggirano sui  $20 \div 60 \text{ l/min}$  per  $25 \div 30 \text{ m}^3/\text{min}$  di gas. Il maggiore inconveniente generato dai cicloni ad umido, al di là del consumo e del ricircolo del liquido, è la formazione di sostanze corrosive conseguente all'interazione tra acqua, componenti della miscela gassosa e polveri.

### 2.2.3 Torre di lavaggio - Spray scrubber

[50] In generale, uno scrubber è un dispositivo utilizzato per pulire o purificare l'aria o gas

flusso, priva di particelle solide in sospensione o goccioline liquide, o da impurità gassose. Esso può essere costituito da un letto di granuli solidi, che agisce come un filtro, o da una torre di lavaggio dove il gas contaminato attraversa la torre attraversando la nebulizzazione di un liquido o di un letto impaccato di granuli, con un liquido che lava i granuli stessi.

Questi sistemi possono sfruttando processi fisici (filtrazione, assorbimento) o per reazioni chimiche, e se è coinvolto un liquido, essi sono chiamati scrubber ad umido altrimenti scrubbers a secco.

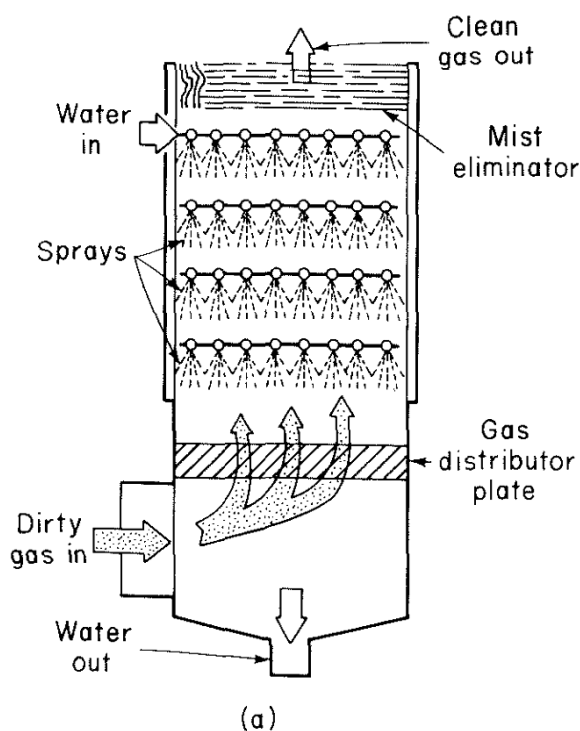


Figura 2. 16 Schema di una torre di lavaggio (spray scrubber )

La dimensione delle particelle è il principale parametro che limita l'efficienza della raccolta delle polveri.

L'efficienza complessiva di un scrubber è proporzionale alle probabilità che tutte le particelle che lo attraversano collidano con un ostacolo sulla strada. Teoricamente, efficienze scrubber umido sono inversamente proporzionale al diametro delle gocce di liquido e direttamente proporzionale alla quantità di goccioline (rapporto spruzzatura). In pratica, l'unione di più goccioline (coalescenza), a causa dell'elevata turbolenza limita queste influenze notevolmente e non è realistico tentare di migliorare le prestazioni di uno scrubber cercando una nebulizzazione più fine e un rapporto di nebulizzazione superiore. La condensazione di vapore è un fattore importante nel miglioramento dell'efficienza dello scrubber.

La condensazione sulle particelle più piccole, che agiscono come nuclei di condensazione ed aumentano la loro dimensione, ne incoraggia quindi l'unione.

Specialmente quando si lavora con particelle piccole è necessario preraffreddare e saturare i gas.

#### 2.2.4 Scrubber ad umido – Scrubber Venturi

Il termine *Wet Scrubber* ingloba una categoria di vari apparati per la depolverazione ad umido. Lo scopo di tutti questi apparati è quello di porre in contatto la corrente gassosa da depurare con la fase liquida: ciò può essere fatto mediante atomizzazione di liquido, forzando il gas all'interno di un contenitore di liquido in quiete o con altri accorgimenti. L'uso di questi apparati non si limita alla rimozione di particolato, vengono bensì utilizzati anche per la rimozione di inquinanti gassosi dai fumi di combustione (tra tutti in particolare gli ossidi di Zolfo  $SO_x$ ), sfruttando fenomeni di dissolvimento o assorbimento dei gas nella fase liquida.

Questi apparati, dopo aver messo in intimo contatto le fasi liquido-gas (o, nel nostro caso, liquido-gas-solido) devono prevedere dei sistemi detti "*mist eliminators*" per la separazione delle gocce dal gas depurato.

Uno dei migliori sistemi di depolverazione ad umido utilizzati è lo *Scrubber Venturi* (Figura 2. 17), il quale prevede che i fumi vengano introdotti in un *Venturi*, un condotto formato da una sezione convergente, una sezione intermedia detta *di gola* e da una sezione divergente. Quando i fumi percorrono il convergente accelerano fino a

raggiungere velocità di  $45\div 120$  m/s in corrispondenza della sezione di gola, dove l'acqua (introdotta all'ingresso del Venturi o direttamente nella sezione di gola) viene finemente atomizzata; sempre in corrispondenza della gola e nel tratto iniziale del divergente si ha la cattura delle polveri da parte di tali gocce che, successivamente incontrano il mist eliminator che le separerà dalla corrente gassosa.

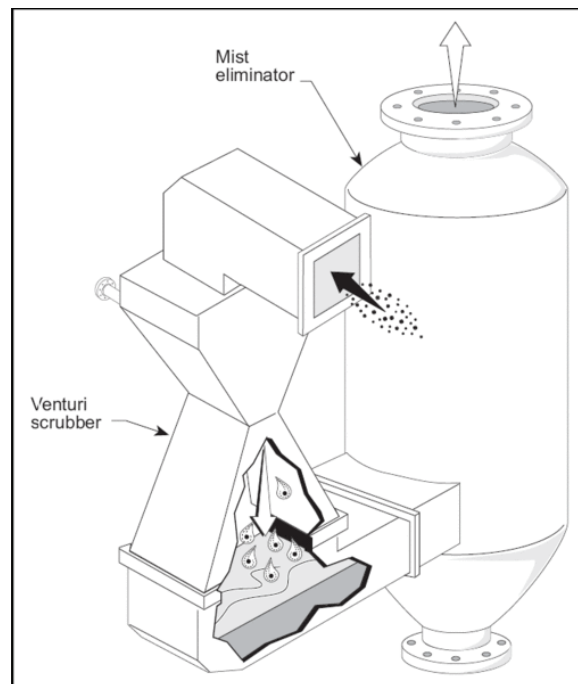
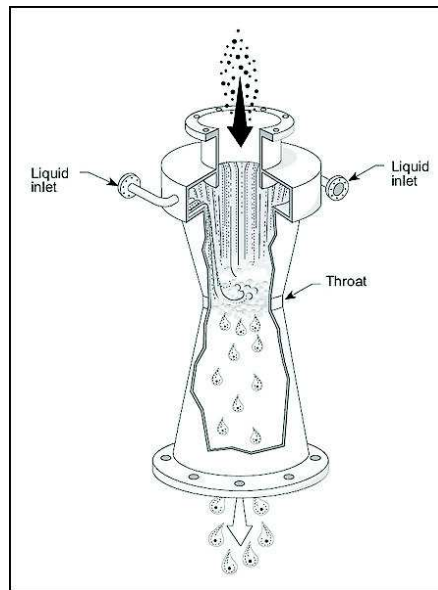


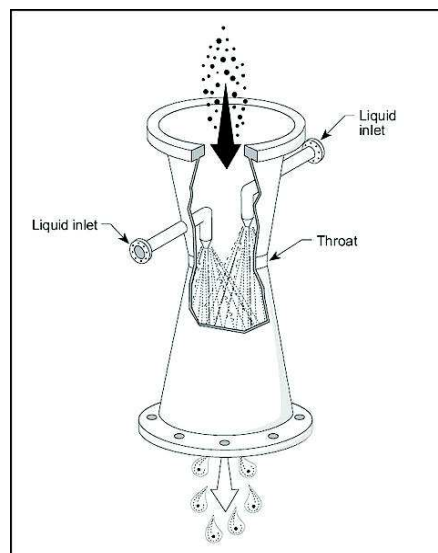
Figura 2. 17 Scrubber Venturi corredato di misteliminator per la separazione delle gocce dal gas

Per quanto riguarda il punto di iniezione del liquido, l'iniezione all'ingresso del convergente (Figura 2. 18) permette di bagnare uniformemente la superficie della sezione di gola (configurazione *wetted-throat*), evitando così il suo intasamento o la sua abrasione. Se la corrente gassosa da trattare è caratterizzata da temperature relativamente basse e alti contenuti di umidità, si può adottare l'iniezione in corrispondenza della sezione di gola (*non-wetted-throat*), come mostrato in Figura 2. 19.





**Figura 2. 18 Scrubber Venturi, configurazione wetted-throat**



**Figura 2. 19 Scrubber Venturi, configurazione non-wetted-throat**

Anche la forma della sezione di gola varia a seconda delle condizioni di design: scrubber Venturi con gola circolare possono trattare portate fino a  $88000 \text{ m}^3/\text{h}$ , per portate maggiori si utilizzano scrubber a sezione rettangolare, inoltre molti di questi apparati consentono di variare l'area della sezione di gola in modo da conservare alte efficienze al variare delle portate in ingresso.

L'efficienza di rimozione cresce con il salto di pressione, nella maggior parte dei sistemi questo parametro è compreso tra i 500 ed i 1500 mmH<sub>2</sub>O, per cui il gas raggiunge velocità di 30÷120 m/s, cosa che si traduce in alti costi d'esercizio. Un altro parametro che influenza fortemente l'efficienza è il rapporto liquido/gas (in breve L/G): se questo parametro è troppo basso, allora non vi sarà liquido sufficiente per inglobare il numero desiderato di particelle solide, normalmente i sistemi lavorano con valori di L/G all'interno del range 0.3÷1.3 l/m<sup>3</sup>, per valori superiori a 1.3 l/m<sup>3</sup> non si hanno incrementi notevoli delle prestazioni.

I principali vantaggi che comporta l'utilizzo degli scrubber Venturi sono:

- possono trattare polveri infiammabili o esplosive con basso rischio.
- possibilità di rimuovere contemporaneamente particolato ed inquinanti gassosi (anche se, nel caso specifico del Venturi, la rimozione di gas inquinanti non è molto incisiva).
- possibilità di trattare fumi e nebbie.
- possibilità di trattare correnti gassose a temperature elevate.
- possibilità di variare il rendimento del processo, agendo sul rapporto L/G.

Per contro, tali apparati presentano gli inconvenienti:

- problemi legati alla corrosione dei componenti.
- problemi connessi alla produzione del refluo, che dovrà eventualmente essere trattato.
- alti costi di esercizio.
- problemi derivanti dalla saturazione e dall'eccessivo raffreddamento dei fumi in uscita, i quali possono condensare allo sbocco del camino creando il cosiddetto *pennacchio*. Il brusco raffreddamento dei fumi rappresenta un'ingente perdita

energetica, il cui costo si va a ripercuotere sulla necessità di inserire una successiva fase di rigenerazione dei gas.

<b><i>Sistema di rimozione</i></b>	<b><i>Campo di applicazione</i></b>	<b><i>Vantaggi</i></b>	<b><i>Svantaggi</i></b>
<b>Filtri a manica</b>	Concentrazioni di polveri non troppo elevate, gas non aggressivo	Alta efficienza e basso ingombro	Alti costi di gestione, sensibilità ai gas aggressivi e all'umidità, rischio di intasamento e di incendio
<b>Precipitatori a umido</b>	Rimozione di polveri adesive, con rischio di incendio o esplosione, portate di gas anche molto variabili	Alta efficienza, bassi costi, basso ingombro, riduzione del rischio di incendi e di esplosioni	Alti costi di gestione, rischio di corrosione, e intasamento, recupero delle polveri sottoforma di fanghi
<b>Separatori elettrostatici</b>	Rimozione di polveri resistive, con un ampio intervallo di dimensioni, portata e temperatura del gas	Alta efficienza, adattabilità ad alte pressioni e temperature, basse perdite di carico	Elevati costi inerziali, manutenzione onerosa, sensibilità alle variazioni di temperatura, rischio di incendio
<b>Cicloni</b>	Rimozioni di polveri grossolane	Bassi costi, semplicità e versatilità, basso ingombro	Efficienza modesta, rischi di erosione, corrosione ed intasamento

**Tabella 2.1 Campi applicativi, vantaggi e svantaggi dei sistemi di depolverazione**

	<i>Dimensioni particelle catturabili [μm]</i>	<i>Perdita di carico [atm]</i>	<i>Efficienza di filtrazione</i>	<i>T<sub>max</sub>dei fumi in ingresso [°C]</i>	<i>Condizione della corrente in uscita</i>	<i>Effetto densità particelle sull'efficienza</i>
<b>Camera di calma</b>	>150	<0.25	50% per particelle sotto i 50 μm circa il 95% per particelle sopra i 300 μm	500	Secca o umida	Efficienza crescente con la densità
<b>Ciclone</b>	>10	0.25÷0.75	80% per particelle sotto i 5 μm circa il 50% per particelle sotto i 3 μm	100	Secca	Efficienza crescente con la densità
<b>Torre di lavaggio</b>	>8	0.5÷1.75	98% per particelle sopra i 5 μm circa il 50% per particelle sotto i 3 μm	200-500	Umida	Effetto limitato
<b>Venturi Scrubber</b>	>0.3÷1	1.75÷7.5	90-99% per particelle sotto i 5 μm	200-250	Umida	Effetto limitato
<b>Filtri a manica</b>	>0.5÷1	0.25÷2.5	95-99% per particelle sotto i 5 μm	200-250	Secca o umida	Nessun effetto
<b>ESP</b>	>0,001	0.06÷0.12	superiore a 99.9% per tutte le particelle sotto i 5 μm	500	Secca o umida	Effetto limitato

**Tabella 2.2 Principali caratteristiche dei depolveratori industriali**

[17] [18] I dispositivi di filtrazione del particolato funzionano in modo tale che il flusso di fumi contenente particelle sospese passi in una regione in cui vengono esercitate forze esterne o sono presenti ostacoli, che favoriscono la loro separazione. Quando sulle

particelle agiscono forze esterne, queste acquisiscono una velocità che ha una direzione diversa da quella del gas e quindi deviano da esso e si depositano sugli elementi filtranti.

Allora per la progettazione di dispositivi di filtrazione del particolato è fondamentale capire come avviene il trasporto delle particelle sospese in un flusso di gas e come queste reagiscono alle forze esterne, che possono essere di diverso tipo (forza di gravità, campo elettrico) e che permettono la loro migrazione dalla corrente gassosa verso la superficie dell'elemento filtrante.

Con il termine aerosol ci si riferisce ad un insieme di particelle sospese in aria o in un altro gas e quindi a questa definizione risponde anche il particolato sospeso nei fumi derivanti dalla combustione.

### 2.3 Efficienza di filtrazione

L'efficienza totale di cattura di un dispositivo per particelle di diametro  $D_p$  (misurato in  $\mu\text{m}$ ), se si fa riferimento al numero, è definita come:

$$\eta_{D_p} = 1 - \frac{\text{numero di particelle di diametro } D_p \text{ per m}^3 \text{ di gas in uscita}}{\text{numero di particelle di diametro } D_p \text{ per m}^3 \text{ di gas in ingresso}}$$

Se invece ci si riferisce alla massa, l'efficienza di cattura è data da:

$$\eta_{m_{D_p}} = 1 - \frac{C_{USCITA_{D_p}}}{C_{INGRESSO_{D_p}}}$$

Dove con C si intende la concentrazione massica di particelle di diametro  $D_p$  nei fumi all'ingresso od all'uscita del sistema di filtrazione; con il termine concentrazione si intende il rapporto fra la massa complessiva delle particelle presenti ed il volume dei gas espresso in  $\text{m}^3$ , pertanto l'unità di misura sarà  $\text{mg}/\text{m}^3$ .

L'efficienza totale di un sistema di filtraggio è dovuta all'azione di diversi meccanismi legati al comportamento del particolato quando nel flusso dei fumi in cui si trova agiscono forze esterne o sono presenti ostacoli filtranti.

## 2.4 Meccanismi di cattura del particolato

Il fattore principale che influenza l'azione di un particolare meccanismo di cattura è la dimensione della particella  $D_p$ .

[13] È necessario precisare che il particolato sospeso nei fumi della combustione di biomassa ha diverse forme e densità, per cui per questo tipo di valutazione si fa sempre riferimento al diametro aerodinamico, ossia il diametro di una sfera avente la densità dell'acqua che si muove in aria in condizioni stazionarie, a parità di flusso.

I principali meccanismi di cattura del particolato sono: impatto, intercettazione e diffusione. I parametri che li caratterizzano vengono descritti di seguito.

### 2.4.1 Impatto inerziale

Quando il flusso di fumi cambia direzione, per esempio per la presenza di un ostacolo, il particolato sospeso tende a deviare dalle linee di corrente a causa della sua inerzia: la cattura per impatto dunque avviene quando la traiettoria vera e propria della particella termina sulla superficie filtrante.

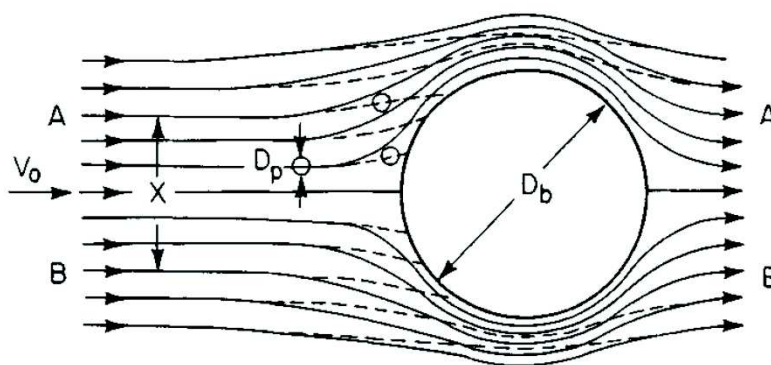


Figura 2. 20 Rappresentazione del meccanismo di impatto: la particella devia dalla traiettoria dei fumi e termina sull'elemento filtrante. Fonte: [36]

Questo meccanismo è caratterizzato dal numero di Stokes, adimensionale, definito come il rapporto tra la distanza di rilassamento della particella e la dimensione dell'elemento filtrante, che per una fibra con una geometria cilindrica o un riempimento sferico è il loro diametro:

$$St = \frac{\tau U_r}{D} \xrightarrow[\tau = \frac{\rho_p D_p^2 C_C}{18 \mu}]{\text{per una particella sferica}} St = \frac{\rho_p D_p^2 C_C U_r}{18 \mu D}$$

dove  $U_r$  è la velocità relativa tra particella e flusso di fumi.

[21] Il numero di Stokes è direttamente collegato con il tempo di rilassamento della particella: se  $\tau$  è alto, cioè quando la massa o la velocità relativa sono significative (elevati  $D_p$ ,  $\rho_p$  o  $U_r$ ), la particella non riesce a seguire il cambiamento di direzione della linea di corrente in quanto la forza di trascinamento dei fumi non è in grado di bilanciare la forza di inerzia velocemente.

Per questi motivi, l'impatto inerziale avviene quando la cattura della particella viene effettuata prima che sia passato il tempo di rilassamento e la forza di trascinamento sta ancora agendo per annullare la forza di inerzia. Questo meccanismo è rilevante per particelle che hanno un numero di Stokes molto maggiore dell'unità ( $St \gg 1$ ), mentre se  $St \ll 1$  l'impatto è praticamente trascurabile.

#### 2.4.2 Intercettazione diretta

Affinché il meccanismo di intercettazione possa avere luogo, devono verificarsi due condizioni: la particella deve riuscire a seguire la linea di corrente del gas e il suo centro deve essere su una traiettoria che passi ad una distanza dalla superficie filtrante che sia minore o uguale del raggio della particella stessa.

Se la particella deve riuscire a viaggiare esattamente su una linea di corrente del gas, la sua inerzia e il suo tempo di rilassamento devono essere contenuti (piccoli  $D_p$ ,  $\rho_p$  o  $U_r$ ), così che la forza di trascinamento possa estinguere la velocità relativa tra particella e fumi prima che la cattura sul filtro avvenga.

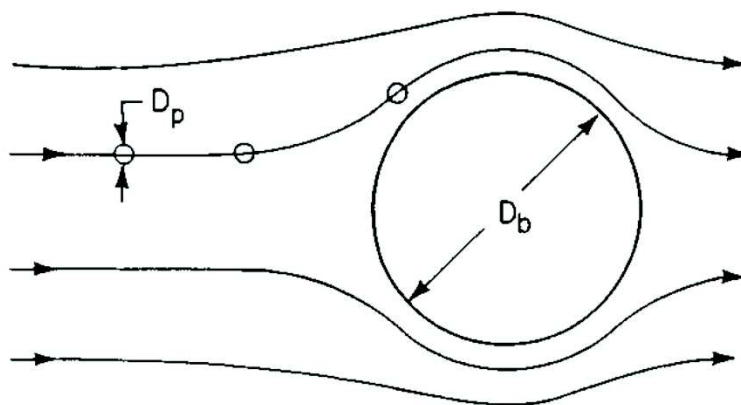


Figura 2. 21 Rappresentazione del meccanismo di intercettazione: la particella rimane sulla traiettoria dei fumi e viene catturata perché vicina all'elemento filtrante. Fonte: [36]

Il fattore che caratterizza questo meccanismo di rimozione del particolato è il parametro di intercettazione, definito come rapporto tra il diametro della particella e il diametro dell'ostacolo filtrante:

$$R = \frac{D_p}{D}.$$

Il valore di R deve essere elevato per aumentare il numero di traiettorie che possono essere intercettate e quindi per promuovere questo meccanismo.



### 2.4.3 Diffusione browniana

Le particelle sospese in un gas sono sempre soggette ad un moto di tipo browniano <sup>1</sup>, ma quando sono sufficientemente piccole, la loro cattura è determinata da un moto casuale dovuto al bombardamento da parte delle molecole del gas, che fanno sì che esse finiscano sulla superficie dell'ostacolo.

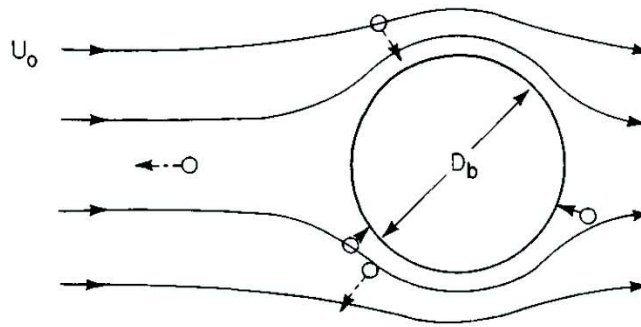


Figura 2. 22 Rappresentazione del meccanismo di diffusione: la particella viene trasportata sull'elemento filtrante dai moti browniani. Fonte: [36]

Il numero di Peclet è il parametro adimensionale che rappresenta il rapporto tra il trasporto di massa convettivo e quello diffusivo, e caratterizza questo meccanismo:

$$Pe = \frac{UD}{\mathcal{D}}$$

dove  $U$  è la velocità del gas, ma anche quella del particolato,  $D$  il diametro dell'ostacolo e  $\mathcal{D}$  il coefficiente di diffusività.

La diffusività  $\mathcal{D}$  è inversamente proporzionale al diametro della particella  $D_p$ :

$$\mathcal{D} = \frac{kTC_c}{3\pi\mu D_p}$$

con  $k$  costante di Boltzmann,  $T$  temperatura,  $C_c$  il fattore di slittamento e  $\mu$  la viscosità del gas.

<sup>1</sup> moto disordinato delle particelle (aventi diametro dell'ordine del micrometro) presenti in fluidi o sospensioni fluide.

Infatti, se il diametro della particella  $D_p$  è piccolo, il coefficiente di diffusività  $\mathcal{D}$  è alto e il numero di Peclet è piccolo, quindi per questa particella il trasporto diffusivo è più influente rispetto quello convettivo e il moto è caratterizzato da spostamenti in ogni direzione in maniera casuale e non principalmente nella direzione del flusso. Anche quando la velocità  $U$  del flusso è limitata, la particella ha a disposizione più tempo per diffondere in altre direzioni, diverse da quella principale dei fumi, e  $Pe$  è piccolo. Invece se il numero di Peclet è alto, il moto della particella nella direzione del flusso prevale sulla diffusione.

#### **2.4.4 Valutazione dell'efficienza di filtrazione dei singoli meccanismi**

Per valutare l'efficienza di filtrazione come funzione del diametro della particella  $D_p$ , bisogna applicare la teoria descritta che utilizza le equazioni di continuità, di Navier-Stokes e del moto della particella per capire come questa si comporta in un determinato campo di moto dei fumi (vedi appendice).

Per le ragioni che andremo a discutere più avanti si è scelto di effettuare le valutazioni di efficienza studiando il caso di una torre di lavaggio; dove la cattura del particolato viene effettuata con gocce di liquido iniettate con appositi dispositivi. Tutti i passaggi che verranno eseguiti però si potranno riadattare a qualsiasi configurazione, inserendo le opportune modifiche e cambiando le condizioni di lavoro.

### **2.5 Efficienza di filtrazione di una goccia di liquido in una torre di lavaggio**

In questa analisi si considera che la cattura all'interno della torre di lavaggio avvenga per mezzo di uno strato di gocce di acqua che viene attraversato da un flusso di fumi carichi di particolato.

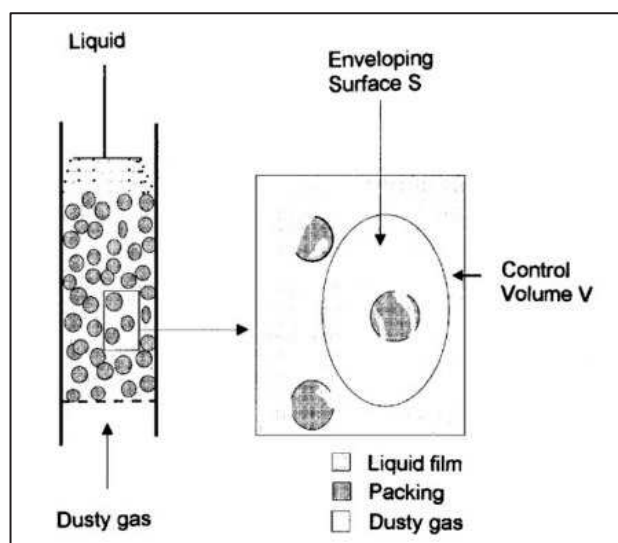


Figura 2. 23 Volume di controllo per descrivere i modelli per i calcoli dell'efficienza di filtrazione: il volume contiene l'elemento filtrante, il liquido per la cattura e i fumi carichi di particolato. Fonte: [22]

Per arrivare al rendimento di filtrazione globale della torre si parte però dalla determinazione dell'efficienza di una singola goccia. Questo è un approccio comune, molto utilizzato in letteratura: [22] si considera allora un volume di controllo isolato che contiene un solo elemento filtrante, nel caso una goccia di liquido, e racchiude una zona in cui arriva il flusso di fumi in cui il particolato si trova sospeso. [23] All'interno di questo volume di controllo si definisce l'efficienza di cattura di una singola goccia come il rapporto tra la proiezione dell'area trasversale racchiusa dalla linea di corrente limite del flusso e la proiezione dell'area trasversale dell'elemento filtrante, ossia la goccia. La linea di corrente limite è quella per la quale tutte le particelle che transitano al suo interno vengono catturate dalle gocce, mentre quelle che passano al di fuori riescono a sfuggire.

Studiando il comportamento della particella all'interno del volume di controllo si può determinare quale meccanismo di filtrazione interviene a seconda della dimensione del particolato e della posizione in cui si trova, o meglio a seconda della linea di corrente su cui viaggia. Da questa valutazione si stabilisce con quale percentuale contribuiscono all'efficienza globale i diversi meccanismi e come questi si influenzano tra loro.

Si ribadisce che la determinazione del comportamento di una particella sospesa nel flusso di fumi si basa su alcune approssimazioni, ossia che la particella viene

considerata sferica e che lo studio delle traiettorie considera ciò che accade ad una sola particella, senza esaminare l'interazione con altro particolato circostante. Naturalmente queste sono semplificazioni forti e quindi andranno fatte ulteriori valutazioni per considerare anche gli effetti della forma della particella e dell'influenza delle altre particelle presenti nel flusso, ma sono utili per capire qual è la fisica alla base della separazione del particolato nei dispositivi di filtrazione.

### 2.5.1 Campo di moto attorno ad una sfera

Per vedere come il particolato si separa dai fumi quando è presente un ostacolo, è necessario partire dal campo di moto di un flusso attorno ad esso: nel caso considerato l'ostacolo è una goccia di liquido iniettata all'interno di una torre, che viene lambita da un flusso di gas.

Si considera il campo di moto del flusso che passa all'interno di uno strato costituito da gocce di acqua. [24] All'interno della torre di lavaggio la goccia iniettata si muove verso il basso con una velocità e con una forma variabili: per semplificare la trattazione però questa si considera come una sfera di fluido in condizioni stazionarie immersa in un flusso di fumi, avente una velocità uniforme e costante (si può considerare la velocità terminale della goccia), che mantiene la sua forma sferica anche durante il processo di cattura del particolato.

Per descrivere il comportamento del flusso di fumi in queste condizioni si utilizzano le linee di corrente derivate da Kuwabara [25]:

$$\psi = \frac{1}{2} \frac{u_{\infty}}{J + \sigma K} \left\{ \frac{1}{2} \left[ \sigma \left( 1 - \frac{2}{5} \alpha \right) + \frac{2}{5} \alpha \right] \frac{a^3}{r} - \frac{1}{2} (2 + 3\sigma) a r + \frac{1}{2} \left[ 1 + \sigma \left( 1 + \frac{1}{2} \alpha \right) \right] r^2 - \frac{1}{10} \alpha (2 + 3\sigma) \frac{r^4}{a^2} \right\} \sin^2 \theta$$

dove  $r$  e  $\theta$  sono le coordinate polari,  $u_{\infty}$  la velocità indisturbata del fluido sufficientemente lontano dalla goccia,  $a$  il raggio della goccia (avendo chiamato  $D$  il diametro dell'elemento filtrante, si ha  $a = D/2$ ),  $\alpha$  il grado di pieno che indica la frazione di volume occupata dall'acqua all'interno della torre ( $\alpha = 1 - \varepsilon$  con  $\varepsilon$  grado di vuoto, frazione del volume della torre disponibile per il passaggio dei fumi),  $K$  e  $J$  sono

due fattori idrodinamici che dipendono da  $\alpha$  e rappresentano gli effetti di interferenza delle gocce che si trovano nelle vicinanze di quella considerata e valgono  $K = 1 - \frac{9}{5}\alpha^{\frac{1}{3}} + \alpha - \frac{1}{5}\alpha^2$  e  $J = 1 - \frac{6}{5}\alpha^{1/3} + \frac{1}{5}\alpha^2$ , e  $\sigma$  è il rapporto tra viscosità dinamica del liquido (acqua) e viscosità del gas,  $\sigma = \frac{\mu_L}{\mu_G}$  e tiene in considerazione che le gocce di acqua non sono sfere solide e rigide ma assumono una diversa forma mentre cadono, che dipende dalla loro viscosità. L'effetto della viscosità si traduce in flussi interni alla goccia, che determinano, al suo esterno, una velocità dei fumi maggiore rispetto al caso di sfere rigide. Per questa ragione, le linee di corrente fuori da una goccia di fluido, passano più vicine ad essa rispetto ad una sfera solida.

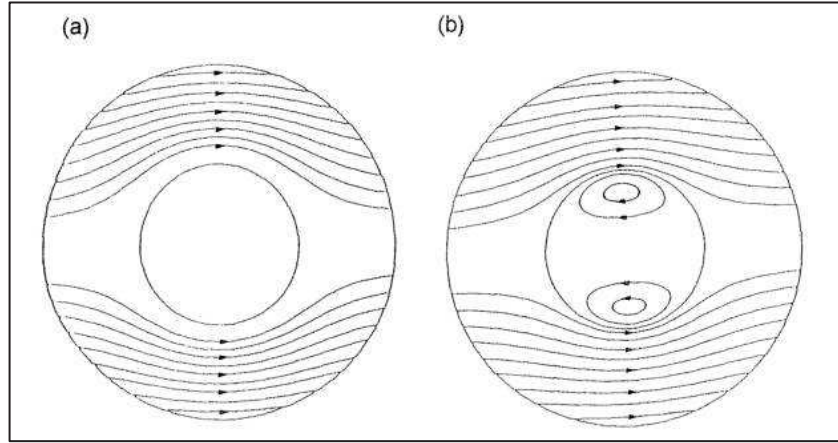


Figura 2. 24 Confronto tra il campo di moto dei fumi attorno a: a) una sfera rigida ( $\sigma \rightarrow \infty$ ); b) una goccia ( $\sigma$  piccolo). Fonte: [25]

[25] La forma delle linee di corrente di Kuwabara viene semplificata per ottenerne una più comoda per le analisi teoriche:

$$\psi = \frac{1}{2} \frac{u_{\infty} a^2 (1 - \alpha)}{J + \sigma K} \left\{ \left( \frac{\frac{r}{a} - 1}{\frac{r}{a}} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{\frac{r}{a} - 1}{\frac{r}{a}} \right)^2 (3\sigma + 4) \right\} \sin^2 \theta$$

### 2.5.2 Traiettoria della particella

[17] Per determinare l'efficienza dei singoli meccanismi bisogna trovare la linea di corrente limite entro la quale tutte le particelle sospese del flusso vengono catturate. Per ottenere questa linea di corrente è necessario individuare la traiettoria della particella per capire dove e come (secondo quale meccanismo) viene catturata.

Infatti quando i fumi cominciano a percorrere linee curvilinee, la particella è incapace di seguirli e tende a deviare continuando per la sua traiettoria a causa della sua inerzia: in questo momento inizia ad agire anche la forza di trascinamento.

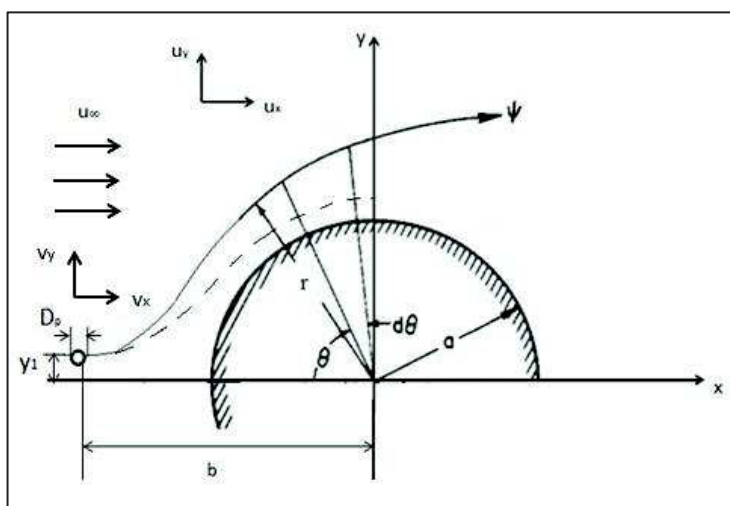


Figura 2. 25 Sistema di Riferimento rispetto al quale vengono applicate le equazioni, compresa quella del moto della particella: la linea continua rappresenta la linea di corrente dei fumi, quella tratteggiata la traiettoria della particella di diametro  $D_p$ .

In assenza di forze esterne sulla particella, e trascurando anche l'effetto della gravità, l'equazione del moto di una particella di diametro  $D_p$  (anche tutte le altre caratteristiche del particolato si prendono note per cui  $\tau$  è calcolabile), quando ad agire è la sola forza di trascinamento, diventa:

$$\tau \frac{dv}{dt} = \mathbf{u} - \mathbf{v}$$

$\tau$ : è un tempo caratteristico associato al moto della particella, detto tempo di rilassamento che indica quanto velocemente una particella raggiunge la velocità del

*flusso (annullando la forza di trascinamento) [18]. Più la particella è piccola e più è basso il tempo di rilassamento e quindi ciò significa che essa impiega poco tempo per superare il transitorio in cui particella e fluido hanno diverse velocità: superato il tempo di rilassamento, la particella viene trascinata completamente dal flusso e con la sua stessa velocità.*

e scomposta nelle due direzioni x e y, scritta in funzione della posizione della particella, risulta:

$$\tau \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} = u_x$$

$$\tau \frac{d^2y}{dt^2} + \frac{dy}{dt} = u_y$$

Le condizioni iniziali sono:

$$\begin{aligned} x(0) &= -b & \frac{dx}{dt}_{t=0} &= u_x(b, y_1) = u_\infty \\ y(0) &= y_1 & \frac{dy}{dt}_{t=0} &= u_y(b, y_1) = 0 \end{aligned}$$

infatti si ipotizza che la particella parta dalla coordinata  $x(0) = -b$  che si trova sufficientemente lontana dalla goccia, per cui la sua velocità risulta ancora quella indisturbata  $u_\infty$  e diretta solo lungo x, mentre lungo y la velocità ha componente nulla (questo vale qualunque sia la coordinata y di partenza se  $x(0) = -b$ ).

La distanza b si può determinare sull'asse delle x sapendo che il flusso prima di raggiungere questo punto viaggia indisturbato, mentre dopo la sua velocità viene influenzata dalla sfera. La distanza b dipende dal grado di vuoto e dalle dimensioni della goccia.

La coordinata  $y_1$  invece è la coordinata di partenza della particella lungo l'asse y: a seconda del suo valore la particella può essere catturata oppure può sfuggire al filtro.

In particolare per calcolare l'efficienza si dovrà determinare il valore di  $y_1$  limite, relativo alla linea di corrente limite, che corrisponde all'ultimo punto da cui può partire la particella per essere catturata.

Rimangono da esplicitare le espressioni delle componenti di velocità del flusso di fumi  $u_x$  e  $u_y$ , a partire dal campo di moto e dalle linee di corrente di Kuwabara. Poiché le linee di corrente sono date in funzione delle coordinate polari, conviene prima ricavarsi la componente radiale e la componente tangenziale di velocità del flusso alle coordinate generiche  $r$  e  $\theta$ :

$$u_r = \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta}$$

$$u_\theta = \frac{-1}{r \sin \theta} \frac{\partial \Psi}{\partial r}$$

Queste sono riconducibili alle componenti di velocità del flusso lungo  $x$  e  $y$  ( $u_x$  e  $u_y$ ):

$$u_x = -u_r \cos \theta + u_\theta \sin \theta$$

$$u_y = u_r \sin \theta + u_\theta \cos \theta$$

A questo punto l'equazione del moto della particella di dimensione  $D_p$  si può risolvere: integrandola due volte e imponendo le condizioni iniziali si può determinare la posizione del particolato nel tempo per vedere se questo viene raccolto dalla goccia e secondo quale meccanismo, o se invece riesce a sfuggire. Infatti a seconda della sua dimensione  $D_p$ , può essere diverso il meccanismo con cui il particolato viene separato e quindi risultano diversi i parametri che ne influenzano la cattura.

Le due componenti di velocità determinate  $u_x$  e  $u_y$  variano a seconda del punto in cui ci si trova (variano con  $x$  e  $y$ ), per cui è richiesta una soluzione dell'equazione del moto per via numerica. Per evitare questo si usa un procedimento approssimato che sostituisce gli andamenti effettivi di  $u_x$  e  $u_y$ , con due velocità costanti che sono le medie



tra le velocità tra i punti 1 e 2. Il punto 1 è il punto iniziale, posto alle coordinate  $(-b, y_1)$  (i segni dipendono dal sistema di riferimento adottato), in corrispondenza del quale la particella si trova ancora sulla linea di corrente dei fumi, che ancora non risentono della goccia, ma subito dopo comincerà ad assumere una propria traiettoria; il punto 2 è alle coordinate  $(0, y_2)$ , ossia si trova sull'asse delle  $y$  ( $y_2$  è legato a  $y_1$  dall'espressione delle linee di corrente  $\Psi$ ), ed è importante perché è considerato l'ultimo punto di cattura per la goccia presa in esame, oltre il quale la particella sfugge o al più può essere filtrata da altra acqua.

Si ha allora:

$$\bar{u}_x = \frac{1}{2}(u_{x1} + u_{x2})$$

Nel punto 1 ci si trova in  $x = -b$  definito proprio in modo tale che la velocità sia quella indisturbata  $u_\infty$ , mentre la velocità nel punto 2 si può determinare dalla caratteristica delle linee di corrente. La distanza sottesa ad una linea di corrente è legata alla portata che rimane invariata, per cui uguagliando le portate nelle sezioni di passaggio 1 e 2 si ricava la velocità in 2, che ha anch'essa componente solo lungo  $x$ :

$$u_{x1}\pi y_1^2 = u_{x2}\pi(y_2 - a)^2$$

Ne deriva:

$$\bar{u}_x = \frac{u_\infty}{2} \left( 1 + \frac{y_1^2}{(y_2 - a)^2} \right)$$

Si definisce anche per la componente lungo  $y$  una velocità costante. Il flusso si sposta dalla coordinata  $y_1$  alla coordinata  $(y_2 + a)$  nello stesso tempo in cui va da  $x = -b$  a  $x = 0$ , ossia nel tempo  $t = b/\bar{u}_x$ :

$$\bar{u}_y = \frac{y_2 + a - y_1}{b/\bar{u}_x}$$

Con queste approssimazioni le soluzioni dell'equazione del moto sono della forma:

$$x(t) = -b + \bar{u}_x t$$

$$y(t) = y_1 - \bar{u}_y \tau (1 - e^{-t/\tau}) + \bar{u}_y t$$

Le equazioni sono in funzione di  $y_1$  e  $y_2$  tra cui va esplicitata la relazione. Sapendo che i punti 1 e 2 si trovano sulla stessa linea di corrente, si impone:

$$\Psi_1 = \Psi_2$$

con:

$$r = a + y_2 \text{ e } \theta = \pi/2$$

$$\Psi_2 = \pi/2) \frac{u_\infty a^2 (1 - \alpha)}{J + \sigma K} \left[ \left( \frac{y_2}{a + y_2} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{y_2}{a + y_2} \right)^2 (3\sigma + 4) \right]$$

$$\Psi_1 = \frac{u_\infty y_1^2}{2}$$

da cui risulta:

$$y_1^2 = \frac{a^2 (1 - \alpha)}{J + \sigma K} \left[ \left( \frac{y_2}{a + y_2} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{y_2}{a + y_2} \right)^2 (3\sigma + 4) \right]$$

A questo punto conoscendo il campo del moto del fluido, considerata una particella di dimensione  $D_p$ , che inizia a deviare dalla linea di corrente in corrispondenza del punto  $(-b, y_1)$  noto, si può valutare se la sua traiettoria finisce sull'elemento filtrante (goccia od anche tessuto) e secondo quale meccanismo.

### 2.5.3 Linee di corrente limite ed efficienza di filtrazione dei meccanismi

Per determinare l'efficienza di filtrazione dei meccanismi di cattura bisogna determinare la linea di corrente limite, descrivibile con la coordinata  $y_{1 \text{ limite}}$  tale per cui

- se la particella parte da una coordinata  $y_1 < y_{1 \text{ limite}}$  viene catturata dalla goccia,
- mentre per  $y_1 > y_{1 \text{ limite}}$  la particella sfugge.

L'efficienza per l'i-simo meccanismo è poi definita come rapporto tra la proiezione dell'area trasversale racchiusa dalla linea di corrente limite del flusso e la proiezione dell'area trasversale dell'elemento filtrante, ossia la goccia:

$$\eta_i = \frac{\pi y_{1 \text{ limite}}^2}{\pi a^2} = \frac{y_{1 \text{ limite}}^2}{a^2}$$

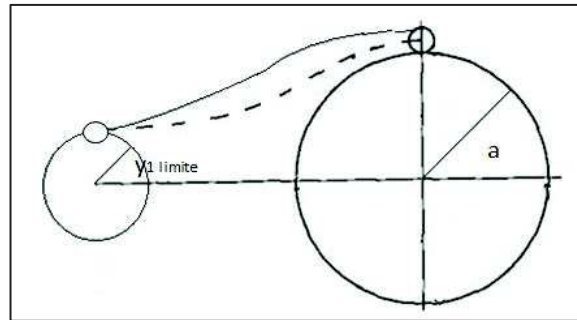


Figura 2. 26 Proiezione delle aree trasversali della linea di corrente limite (di raggio  $y_{1 \text{ limite}}$ ) e dell'elemento filtrante (di raggio  $a$ ): facendone il rapporto si ottiene l'efficienza di filtrazione per un determinato meccanismo.

Per trovare  $y_{1 \text{ limite}}$ , le equazioni e i passaggi da utilizzare sono quelli visti in precedenza, ma sarà necessario imporre condizioni diverse a seconda del meccanismo che si sta considerando. Infatti ogni particella, in relazione alla sua dimensione, tende a spostarsi dalla linea di corrente dei fumi quando questi assumono una curvatura nel loro percorso, e non appena accade quanto descritto gli stessi fumi cominciano ad esercitare una forza di trascinamento sempre crescente fino ad annullare la velocità relativa che questi hanno con la particella impiegando esattamente il tempo di rilassamento  $\tau$ .

Allora, come già anticipato, se la cattura avviene prima che sia trascorso il tempo  $\tau$ , si tratta di impatto, se invece avviene dopo  $\tau$ , si ha intercettazione (la diffusione segue leggi diverse che verranno trattate in seguito).

Considerando costante la densità del particolato  $\rho_p$ , a determinare l'avvenimento di un fenomeno piuttosto che un altro è la dimensione della particella  $D_p$  e la linea di corrente su cui si trova.

## 2.6 Efficienza dei meccanismi di cattura del particolato con gocce di acqua

Per la valutazione del rendimento di filtrazione nel caso di acqua nebulizzata si è usato il modello di Kim, Jung, Oh e Lee [33], che parte dalla valutazione delle efficienze di ogni meccanismo di cattura. In particolare viene valutata l'efficienza di una singola goccia di liquido, da cui derivare successivamente quella complessiva del getto di acqua.

Ricordando che l'espressione delle linee di corrente di Kuwabara semplificata nel caso di attraversamento da parte di un flusso di gas di uno strato di gocce di acqua è:

$$\Psi = \frac{1}{2} \frac{u_{\infty} a^2 (1 - \alpha)}{J + \sigma K} \left\{ \left( \frac{\frac{r}{a} - 1}{\frac{r}{a}} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{\frac{r}{a} - 1}{\frac{r}{a}} \right)^2 (3\sigma + 4) \right\} \sin^2 \theta$$

Allora da questa formula si ricava la linea di corrente limite per i diversi meccanismi e valutando il rapporto tra le proiezioni delle aree della linea limite e dell'elemento filtrante si ottiene l'efficienza.

### 2.6.1 Efficienza di filtrazione per impatto

A seconda della dimensione  $D_p$  della particella, l'impatto può essere o non essere l'unico meccanismo ad agire, oppure può non agire affatto.

Si distinguono allora casi diversi proprio a seconda dei diversi valori di  $D_p$ .

I. Se la **dimensione della particella  $D_p$  è piuttosto grande**, il suo tempo di rilassamento  $\tau$  è elevato e si ha impatto, ovvero la cattura avviene prima che sia trascorso questo tempo.

Per di più se la particella arriva in corrispondenza dell'ultimo punto di cattura, sull'asse delle y, prima che sia passato  $\tau$ , l'impatto è l'unico meccanismo che agisce.

La linea di corrente limite si trova imponendo che al tempo  $t = b/\bar{u}_x$  la posizione della particella è data dalle coordinate:

$$x(t) = 0 \quad e \quad y(t) = a + D_p/2$$

ossia si trova in corrispondenza della sezione , ultima sezione utile per la cattura, ad una distanza dalla goccia pari al raggio della particella stessa  $D_p/2$ .

II. Seguendo questo ragionamento **si può determinare la dimensione minima delle particelle sopra la quale l'unico meccanismo in gioco è l'impatto**. Per determinare questa particolare dimensione, è sufficiente imporre che la particella arrivi al punto detto, non in un tempo generico, bensì proprio nel tempo  $\tau$ :

$$x(\tau) = 0 \quad e \quad y(\tau) = a + D_p/2.$$

In questo caso è  $D_p$  l'unica incognita, e poi ne deriva anche  $y_1$  limite con cui calcolare l'efficienza.

Per questa dimensione e tutte quelle superiori, l'unico meccanismo che agisce è l'impatto.

III. **Al di sotto della dimensione limite prima determinata invece agiscono sia impatto che intercettazione**. Per quanto riguarda l'impatto, l'efficienza di cattura è ancora una volta determinabile dalla valutazione della linea di corrente limite: in questo

caso, nel tempo  $\tau$ , più contenuto perché  $D_p$  è minore, la particella non riesce ad arrivare alla sezione 2, ma già prima inizia ad essere trascinata dai fumi. Allora affinché continui a verificarsi impatto, bisogna imporre che esattamente dopo il tempo  $\tau$  la particella sia già stata catturata e quindi si trovi sulla superficie della goccia, o meglio a una distanza da essa pari al suo raggio, che equivale a dire, ragionando in coordinate polari:

$$r(\tau) = a + D_p/2.$$

Richiedendo questa condizione si può risalire al valore di  $y_1$  limite.

**IV. Esiste anche una dimensione  $D_p$ , sotto la quale non si ha più impatto:** questo accade quando la particella, prima che sia trascorso  $\tau$  o al più esattamente dopo  $\tau$ , non ha modo di urtare sulla superficie della goccia qualunque sia la sua posizione di partenza  $y_1$ , in quanto la forza di trascinamento annulla velocemente la forza di inerzia. Questa si trova stabilendo che una particella di dimensione ancora non nota, parta da  $y_1=0$  e al tempo  $\tau$  arriva in corrispondenza della goccia, sull'asse x, ossia:

$$x(\tau, y_1 = 0) = -a - D_p/2.$$

L'unica incognita è  $D_p$ .

Il rendimento di filtrazione per impatto è dato in funzione del numero di Stokes, in particolare come sua potenza:

$$\eta_{imp} = \left( \frac{St}{St + 0.35} \right)^2$$

Il numero di Stokes è dato da:

$$St = \frac{\rho_p D_p^2 U_r}{18 \mu D}$$

con  $\rho_p$  densità del particolato;  $D_p$  diametro del particolato;  $U_r$  velocità relativa tra liquido e fumi (e particolato);  $\mu$  viscosità dei fumi e  $D$  diametro della goccia.

Più è grande il numero di Stokes e più aumenta il fenomeno dell'impatto, infatti a numeratore compaiono i termini legati a massa e velocità del particolato e quindi alla sua inerzia: più questa è alta e più il particolato non riesce a seguire la traiettoria dei fumi. Ciò accade se il particolato:

- è più grande (alto  $D_p$ ),
- ha una densità maggiore ( $\rho_p$ );
- ha una velocità relativa con il liquido elevata ( $U_r$ ).
- Il numero di Stokes è alto anche se i fumi sono poco viscosi ( $\mu$ ).

D. Se il diametro della goccia è piccolo anche l'impatto è favorito perché è maggiore la superficie filtrante ( $St$  cresce).

- Per  $St \ll 1$  il particolato segue strettamente le linee di flusso del fluido e il rendimento per impatto è praticamente nullo.
- Il rendimento per impatto inizia ad avere valori significativi quando Stokes è confrontabile con il valore costante di 0.35 a denominatore.
- Per  $St > 1$  il particolato inizia ad avere un'inerzia maggiore e tende più facilmente a cambiare direzione rispetto quella del flusso.
- Per  $St \gg 1$  il particolato devia facilmente dal flusso, soprattutto dove questo decelera bruscamente e il rendimento per impatto è molto elevato.

Per la determinazione della velocità relativa tra fumi e acqua si usa il modello di Holmes, che utilizza una velocità media in tutte le zone della torre:

$$U_r = \frac{1}{2}(2U + v_L)$$

con  $U$  velocità dei fumi;  $v_L$  velocità dell'acqua in fuoriuscita dagli ugelli (o altri dispositivi con lo stesso scopo), data dal rapporto tra la portata di acqua in uscita da un ugello  $\dot{m}_L$  e la sezione dell'ugello  $S_n$ .

Il modello di Lee usa la forma:

$$U_r = \frac{1}{2} [(U + v_L) + (U + U_{wt})]$$

con  $U_{wt}$  velocità terminale della goccia, calcolata come:

$$U_{wt} = D \left[ \frac{3gD(\rho_L - \rho_G)}{\rho_G} \right]^{1/2}$$

dove  $D$  è il diametro della goccia;  $g$  è l'accelerazione di gravità;  $\rho_L$  la densità del liquido;  $\rho_G$  la densità del gas.

Ne deriva la forma della velocità relativa, da inserire nel numero di Stokes:

$$U_r = \frac{1}{2} (2U + \dot{m}_L/S_n + D \left[ \frac{3gD(\rho_L - \rho_G)}{\rho_G} \right]^{1/2})$$

### 2.6.2 Efficienza di filtrazione per intercettazione

Tutte le particelle, anche quelle più piccole, sono dotate di una loro inerzia, ma nel caso di intercettazione questa si esaurisce (sotto l'azione della forza di trascinamento), prima che la particella urti contro il filtro, per cui passato il tempo  $\tau$  continua il suo percorso seguendo i fumi e viene catturata solo se abbastanza vicino alla goccia.

Anche in questo caso l'efficienza per intercettazione può essere vista come il rapporto tra la proiezione della linea di corrente limite e la proiezione della sfera, per cui per una certa particella di dimensione  $D_p$ , minore di quella minima per cui al di sopra c'è solo impatto, va determinata la coordinata  $y_{limite}$ , sopra la quale le particelle sfuggono.

Le equazioni sono le stesse, solo che si impone che, essendo passato il tempo  $\tau$  senza che la particella abbia impattato sulla sfera, il particolato inizi a seguire esattamente una linea di corrente dei fumi: quella che al limite può essere intercettata è quella che nel



punto 2 dista proprio  $y_2 = D_p/2$ . Imponendo questa condizione si può ricavare  $y_{1\text{limite}}$  e quindi il rendimento dovuto al meccanismo di intercettazione. Tutte le particelle che partono da una coordinata  $y_1 < y_{1\text{limite}}$  vengono catturate, ma i meccanismi che si possono verificare sono l'intercettazione o l'impatto.

Infatti se la particella parte da una distanza  $y_1$  poco minore di quella limite di intercettazione, essa si trova ancora abbastanza lontano dalla goccia da poter essere trascinata dai fumi e essere catturata dopo il tempo di rilassamento per intercettazione; se invece la stessa particella parte da una distanza  $y_1$  sufficientemente minore di quella limite di intercettazione e quindi già piuttosto vicina alla goccia, tale per cui prima che sia trascorso il tempo  $\tau$  sia già stata catturata, questa viene catturata per impatto e l'efficienza per questo meccanismo viene calcolata come descritto nel paragrafo precedente (punto III).

I due meccanismi sono comunque ben distinguibili a seconda della distanza  $y_1$  da cui parte il particolato in corrispondenza di  $x = -b$ , per cui è possibile analizzare i parametri relativi ed ottimizzarli.

Come già spiegato, c'è una dimensione  $D_p$  sopra la quale l'intercettazione non ha luogo: in questa situazione si ha una sola efficienza relativa al meccanismo di impatto.

**Esiste inoltre anche una dimensione  $D_p$  sotto la quale invece l'impatto non agisce ma si ha solo intercettazione:** in questo caso è sufficiente trovare il valore di  $y_{1\text{limite}}$  per intercettazione, ossia considerando che la particella arrivi nella sezione 2 su una linea di corrente posta a una distanza dalla goccia pari al raggio della particella stessa.

Il rendimento per intercettazione, realizzata grazie a gocce d'acqua, nel modello considerato, è dato da:

$$\eta_{int} = \frac{1 - \alpha}{J + \sigma K} \left[ \left( \frac{R}{1 + R} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{R}{1 + R} \right)^2 (3\sigma + 4) \right]$$

I parametri influenti sono:

R. il parametro di intercettazione che consiste nel rapporto tra il diametro del particolato ( $D_p$ ) e quello della goccia (D):

$$R = \frac{D_p}{D}$$

Si può notare che la forma del rendimento per intercettazione è legata agli stessi parametri dell'efficienza di cattura che avviene per diffusione. L'intercettazione infatti non è da vedersi come un caso particolare di impatto, come invece spesso viene descritta, in quanto questo meccanismo è legato alla capacità delle particelle di adeguarsi a bruschi cambiamenti di direzione delle linee di flusso, per cui non avviene a causa della sua inerzia, anzi, proprio perché questa è piccola, la particella riesce a seguire il flusso.

All'aumentare di R e quindi al diminuire della dimensione dell'ostacolo D, l'effetto dell'intercettazione aumenta: se le gocce presenti nel flusso sono più piccole, un numero maggiore di dimensioni del particolato ricade nella condizione per la quale avviene l'intercettazione, quindi ci sono più traiettorie intercettabili.

Naturalmente poi l'intercettazione ha un maggiore effetto su particelle più grandi ( $D_p$  maggiore).

$\alpha$ . Abbassando il grado di pieno (K e J diminuiscono entrambi), il rendimento di intercettazione, sulle dimensioni del particolato su cui agisce, cala bruscamente. Avendo più gocce a disposizione si hanno infatti più traiettorie per le quali può avvenire intercettazione, quindi per favorire l'intercettazione  $\alpha$  deve essere grande.

$\sigma$ . Anche in questo caso incide sul rendimento il modo in cui le gocce di liquido si deformano o presentano ricircoli al loro interno, ma non in maniera così rilevante. Comunque per migliorare l'intercettazione  $\sigma$  deve essere contenuto: se il liquido è meno viscoso, le gocce si deformano di più e fanno in modo che le linee di corrente passino più vicino alla superficie filtrante.

### 2.6.3 Efficienza di filtrazione per diffusione

Come anticipato precedentemente, la diffusione dovuta ai moti browniani è un fenomeno a cui sono soggette le particelle di ogni dimensione, ma se il loro diametro  $D_p$  è sufficientemente piccolo, il bombardamento determinato dalle molecole di gas vince ed è proprio questo a determinare gli spostamenti casuali della particella, che non ha più una sua dinamica vera e propria.

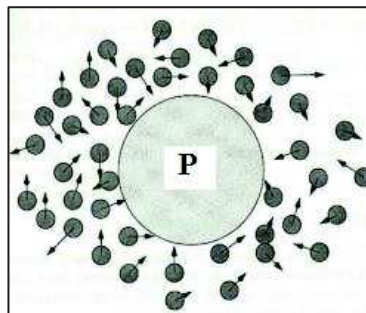


Figura 2. 27 Rappresentazione del bombardamento delle molecole di gas sulla particella sospesa nel flusso.

**Quindi sotto una certa dimensione  $D_p$  della particella si può affermare che impatto e intercettazione non hanno più effetto, ma il meccanismo dominante è la diffusione.**

[17] [26] I moto browniani fanno riferimento ai movimenti casuali delle particelle più piccole quando queste sono immerse in un fluido. Nonostante questo fenomeno sia determinato da eventi casuali, se non si considerano nel dettaglio le interazioni tra particelle e fluido, ma si assume che il movimento delle particelle consiste in successivi trasferimenti statisticamente indipendenti, si può scrivere l'equazione del moto nella stessa forma di quella di un sistema dinamico tradizionale.

Si scrive quindi l'equazione del moto relativa ad una singola particella, assumendo che le uniche forze ad agire siano la forza di trascinamento (sempre presente se non si è nel vuoto) e la forza legata all'accelerazione  $\alpha(t)$  dovuta al bombardamento delle molecole del gas:

$$m_p \frac{d\mathbf{v}}{dt} = - \frac{3\pi\mu D_p}{C_c} \mathbf{v} + m_p \alpha(t)$$

$$\xrightarrow{\text{dividendo per } m_p} \frac{d\mathbf{v}}{dt} = - \frac{1}{\tau} \mathbf{v} + \alpha(t)$$

Questa costituisce l'equazione di Langevin e può essere scomposta in due parti, una continua e l'altra discontinua (dimostrazione in appendice).

Da cui il modello di Lee fornisce l'espressione del rendimento di filtrazione per questo meccanismo:

$$\eta_{diff} = 0.7 \left\{ \frac{4}{\sqrt{3}} \left( \frac{1-\alpha}{J+\sigma K} \right)^{1/2} Pe^{-1/2} + 2 \left( \frac{\sqrt{3}\pi}{4Pe} \right)^{2/3} \left[ \frac{(1-\alpha)(3\sigma+4)}{J+\sigma K} \right]^{1/3} \right\}$$

Per capire come poter favorire questo meccanismo, si analizzano tutti i termini.

L'efficienza di filtrazione tramite gocce di acqua per diffusione dipende da:

Pe: numero di Peclet definito come:

$$Pe = \frac{UD}{\mathcal{D}}$$

con U velocità del flusso dei fumi (e del particolato, considerando il flusso una fase continua, ipotizzando che in ingresso alla torre fumi e particolato si muovano con la stessa velocità), D diametro della goccia e  $\mathcal{D}$  coefficiente di diffusione.

Il coefficiente di diffusione è inversamente proporzionale alla dimensione del particolato:

$$\mathcal{D} = \frac{kTC_c}{3\pi\mu D_p}$$

con  $k$  costante di Boltzmann ( $=1,38065 \cdot 10^{-23}$ ),  $T$  temperatura in K,  $\mu$  viscosità dei fumi,  $D_p$  diametro del particolato,  $C_C$  fattore di slittamento o di Cunningham dato da  $C_C = 1 + 1,67 \frac{\lambda}{D_p/2}$ , dove  $\lambda$  è il cammino libero medio del gas all'interno del letto ed è pari a:  $\lambda = 6,51 \cdot 10^{-8}$  a 25 °C, temperatura dei fumi nella torre nell'impianto test) [17].

Se il numero di Peclet è alto significa che il particolato nel flusso tende a muoversi seguendo la direzione principale del flusso stesso, ossia ha più effetto il trasporto di tipo convettivo; se invece Peclet è basso significa che il particolato si sposta, diffonde, in diverse direzioni rispetto quella principale del flusso.

Per favorire la diffusione allora  $Pe$  deve essere basso e ciò dipende dai seguenti parametri:

U. se il flusso che trascina il particolato ha una velocità  $U$  elevata, il numero di Peclet aumenta e l'efficienza per diffusione cala, perché la particella non ha sufficiente tempo per diffondere, ma tende più facilmente a seguire il flusso per convezione. Allora per aumentare  $\eta_{diff}$  la velocità dei fumi deve essere contenuta.

D. Se l'ostacolo, la goccia, è piccolo ( $D$  ridotto), la superficie filtrante è maggiore e la diffusione avviene maggiormente.

$\mathcal{D}$ . Più è piccola la particella da catturare, più è grande il coefficiente di diffusione e piccolo il numero di Peclet, che vuol dire che il trasporto di materia più influente è quello diffusivo rispetto a quello convettivo.

In particolare la diffusione comincia ad avvenire per diametri del particolato minori a  $0,1 \mu m$ .

Si nota inoltre che se il flusso è a temperatura maggiore ( $T$  alta) ed è poco viscoso ( $\mu$  bassa), il particolato diffonde meglio.

Altri parametri da cui dipende l'efficienza per diffusione sono:

$\alpha$ . il grado di pieno è il complemento a 1 del grado di vuoto  $\varepsilon$ , dato dal rapporto tra il volume lasciato libero e quindi occupato dai fumi e il volume totale. Il valore di  $\alpha$  dipende quindi dalla quantità di acqua iniettata in quanto rappresenta la frazione di volume della torre occupata dall'acqua ( $\alpha = 1 - \varepsilon$ ).

Il grado di pieno compare in altri parametri di  $\eta_{\text{diff}}$ , ossia K e J: si può notare che se  $\alpha$  diminuisce, l'efficienza per diffusione, sul particolato molto piccolo cala. Allora per catturare dimensioni del particolato piuttosto piccole ( $D_p < 0,1 \mu\text{m}$ ) deve esserci molta acqua, ma, come si nota dalla distribuzione granulometrica del particolato da biomassa, particelle con dimensioni di questo ordine sono presenti in quantità molto piccole, quasi nulle.

K. Il parametro K è il coefficiente idrodinamico di Kuwabara che dipende dal grado di vuoto ed è dato da:

$$K = 1 - \frac{9}{5}\alpha^{\frac{1}{3}} + \alpha - \frac{1}{5}\alpha^2$$

Al variare di  $\alpha$  tra 0 e 1, il suo valore cala da 1 a 0: infatti esso è legato alla mobilità dei fluidi, per cui se il grado di pieno è 0, ossia la torre è libera, il flusso di gas ha il massimo spazio a disposizione e K ha il valore più alto, viceversa se si ha tutta acqua ( $\alpha=1$ ), il gas non può passare e  $K=0$ . Tiene conto quindi dell'influenza delle gocce limitrofe sulle linee di corrente assunte dal flusso.

J. La grandezza J è un altro parametro idrodinamico definito come:

$$J = 1 - \frac{6}{5}\alpha^{1/3} + \frac{1}{5}\alpha^2$$

Anche in questo caso se  $\alpha=0$  si ha  $J=1$  in quanto non si ha acqua e il gas ha tutta la torre a disposizione, mentre se  $\alpha=1$  vale  $K=0$  e quindi la sezione della torre risulta piena di acqua e il gas ha mobilità nulla. Anche con questo parametro si tiene conto di come le gocce vicine deviano i fumi.

$\sigma$ . La variabile  $\sigma$  è il rapporto tra viscosità di acqua e aria, quindi dipende dai fluidi utilizzati:

$$\sigma = \frac{\mu_L}{\mu_G}.$$

Si nota che se  $\sigma$  aumenta,  $\eta_{diff}$  diminuisce (l'effetto si vede dove il rendimento di diffusione è apprezzabile, ossia per particelle di particolato molto piccole, con diametri inferiori a 0,1  $\mu m$ ). Questa grandezza tiene conto di come si deforma la goccia nella fase di caduta lungo il moto nella torre, e degli effetti di ricircolo che avvengono all'interno della goccia stessa.

#### 2.6.4 Efficienza di cattura complessiva con gocce di acqua

L'efficienza totale della torre che presenta come elemento di cattura le gocce di acqua è data dalla somma di tutti i rendimenti dei diversi meccanismi considerati:

$$\eta_{tot\ acqua} = \eta_{diff} + \eta_{int} + \eta_{imp}.$$

[25] [29] Molti modelli utilizzati per la valutazione dell'efficienza di cattura, utilizzano la somma dei rendimenti dei singoli meccanismi per la determinazione di quello totale, in quanto considerano i meccanismi additivi: in particolare si ritiene che i fenomeni di rimozione del particolato siano indipendenti tra loro, in quanto è possibile individuare intervalli di dimensione delle particelle per i quali è dominante uno solo dei meccanismi, mentre gli altri hanno effetto praticamente nullo.

#### Efficienza dei meccanismi in funzione del diametro della particella $D_p$

Dall'analisi teorica precedente risulta allora che, a seconda della dimensione della particella  $D_p$ , e successivamente della posizione in cui si trova, agiscono diversi meccanismi di cattura, per i quali è possibile arrivare ad una espressione dell'efficienza di cattura, basata fondamentalmente sulla dinamica della particella in risposta a forze esterne o alla presenza di ostacoli.

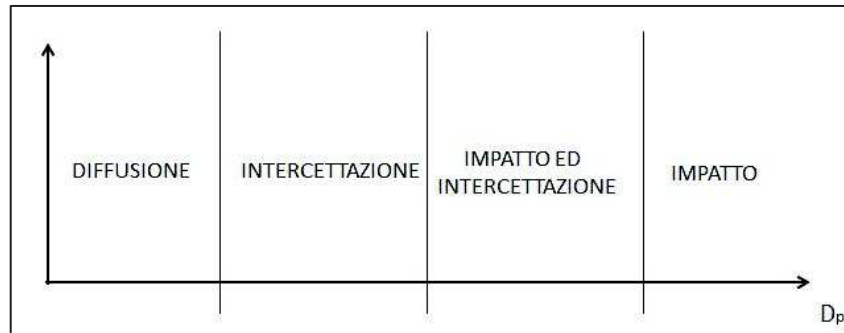


Figura 2. 28 Meccanismi agenti per la cattura in funzione della dimensione del particolato  $D_p$ .

In particolare si possono individuare 4 intervalli per la dimensione  $D_p$ , in cui i meccanismi entrano in gioco diversamente:

- a) esiste una dimensione  $D_p$  limite sopra la quale vi è solo impatto;
- b) c'è un intervallo che comprende i diametri delle particelle, per le quali intervengono sia intercettazione che impatto, dipendentemente dalla posizione della linea di corrente su cui viaggiano inizialmente;
- c) esiste una seconda dimensione  $D_p$  limite sotto la quale l'impatto non agisce più, ma c'è solo intercettazione;
- d) esiste una dimensione  $D_p$  sufficientemente piccola, sotto la quale il bombardamento delle molecole non permette alla particella di seguire una propria traiettoria, per cui la cattura avviene solo per diffusione.

Tutte le considerazioni e i passaggi svolti per il caso di cattura del particolato tramite gocce di acqua iniettate da un apposito distributore, si possono adattare anche a diverse tipologie e geometrie di elemento filtrante.

Per esempio nel caso di riempimento casuale costituito da corpi sferici, la geometria rimane quella della goccia, ma cambia il fatto che i corpi sono solidi, rigidi, fissi o fluidificati: i passaggi si ripetono ma si avrà una diversa espressione delle linee di corrente, da cui dipendono tutti i risultati delle equazioni.

O ancora è possibile aggiustare i calcoli per le fibre di un tessuto: in questo caso, oltre a cambiare l'espressione della linea di corrente, cambia anche la geometria dell'elemento



filtrante, che è considerata cilindrica, per cui dovrà essere modificata anche l'espressione dell'efficienza inserendo le giuste proiezioni delle aree a numeratore e denominatore.

## 2.7 Ulteriori meccanismi di cattura presi in considerazione

I meccanismi base appena descritti si applicano nei filtri a secco (nei quali cioè non si ha aggiunta di un liquido) si è valutato in prima battuta l'impiego di ulteriori meccanismi che rafforzassero i primi in maniera da aumentare l'efficienza di cattura del particolato.

Nei filtri a umido la cattura del particolato solido avviene per inglobamento in una fase liquida opportunamente dispersa. In generale, nei sistemi di filtrazione a umido per particolato solido la cattura e la rimozione di polvere avviene da parte del liquido: il liquido si può presentare sotto forma di goccioline molto fini (in questo caso si parla di atomizzazione) oppure sotto forma di velo steso o meno su pareti collocate lungo il percorso di filtraggio; le due modalità appena descritte possono presentarsi anche in contemporanea, specie là dove il contatto liquido-gas avvenga in regime di elevata turbolenza. I meccanismi di cattura sono gli stessi agenti nel caso di filtraggio a secco (impatto inerziale, intercettazione diretta e diffusione) ma si aggiunge l'effetto di condensazione, che si realizza quando le particelle costituiscono nuclei di condensazione per il vapore reso sovrassaturo dal contatto con il liquido. Solitamente, il processo di filtraggio a umido di particelle solide si declina attraverso le seguenti fasi:

- condizionamento dell'effluente gassoso, con riduzione della temperatura e saturazione del gas stesso;
- dispersione della massa liquida in gocce, vortici, veli, allo scopo di aumentare la superficie di contatto tra gas e liquido;
- meccanismi di impatto, intercettazione, diffusione e condensazione tali da provocare la cattura delle particelle solide da parte del liquido;
- separazione dall'effluente gassoso del liquido (e del particolato in esso inglobato).

### 2.7.1 Condensazione eterogenea

Questo è un fenomeno che avviene in una regione dello spazio in cui sono presenti una fase solida ed una fase di vapore, in particolare avviene che l'acqua, non avendo

sufficiente energia per condensare su se stessa, inizia a farlo sulla particella di particolato che si comporta da nucleo condensante, incrementandone le dimensioni.

In un primo momento avviene la nucleazione, cioè si formano le prime gocce sulla superficie della particella ed in seguito avviene l'accrescimento che porta ad un aumento del volume.

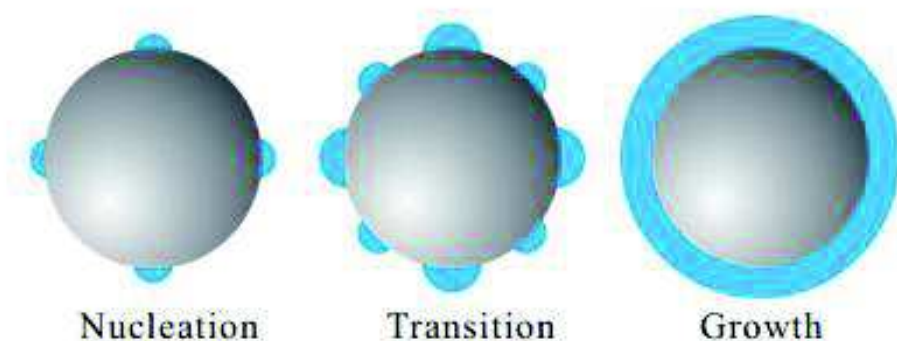


Figura 2. 29: Nucleazione ed accrescimento

Per attivare la condensazione occorre superare una barriera energetica (causata dalle tensioni superficiali), e per farlo il vapore deve trovarsi una condizione di supersaturazione. Ovvero vi deve essere nell'aria una quantità di acqua superiore a quella che vi potrebbe essere a quella temperatura e a quella pressione in condizioni di saturazione, cioè con un grado igrometrico pari a 1.

Viene così definito il grado di supersaturazione (S):

$$S = \frac{p_v}{p_{v,s}(T)}$$

Dove  $p_v$  è la pressione di vapore,  $p_{v,s}$  è la pressione che il vapore avrebbe in condizioni di saturazione a quella temperatura.

Per incrementare questo parametro occorre quindi alzare la pressione del vapore o abbassare la temperatura.

Teoricamente e sperimentalmente è facile dimostrare che più sono piccole le particelle che fungono da nuclei condensanti e più alto deve essere alto il valore di supersaturazione richiesto per consentire la nucleazione e successivamente l'accrescimento, i valori della

supersaturazione in funzione delle dimensioni delle particelle sono riportati in Figura 2. 17:

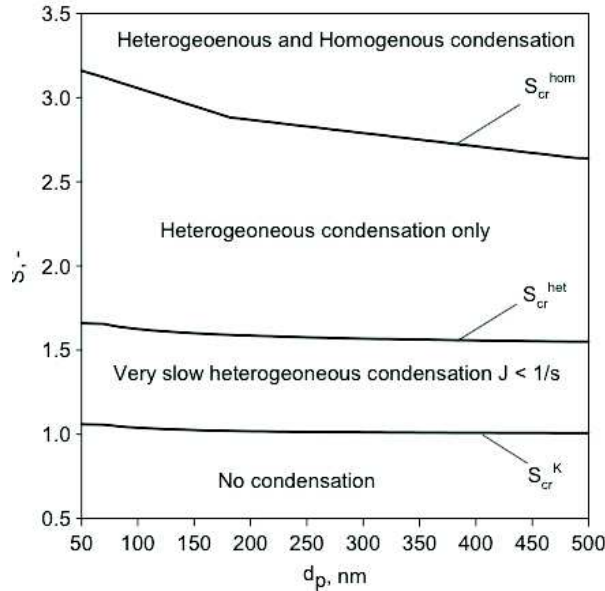


Figura 2. 30: Valori di supersaturazione in funzione della dimensione delle particelle di nucleazione

Per avere un'idea dell'ammontare di particelle che sono state sede di nucleazione durante la fase di nucleazione ricorriamo alla teoria di Fletcher:

Il rateo di formazione di embrioni per secondo, per metro quadro e per particella viene calcolato attraverso la seguente espressione:

$$J = K_c 4 \pi r_p^2 e^{(-\Delta G^*/K_B T)}$$

Dove  $K_c$  è una costante cinetica [ $1/m^2s$ ] e ha un valore di circa 1025,  $r_p$  è il raggio della particella e  $\Delta G$  è l'energia di Gibbs definita come l'energia libera di formazione di un embrione definita come:

$$\Delta G^* = \frac{8\pi M_w^2 \tau^3}{3(R_v T \rho_l \ln S)^2} f(m, x)$$

Dove  $R_v$  è la costante universale dei gas,  $M_w$  la massa molecolare,  $\tau$  la tensione superficiale della specie condensante e  $f(m, x)$  il fattore geometrico di Fletcher definito come:

$$f(m, x) = \left\{ 1 + \left( \frac{1 - mx}{h} \right) + x^3 \left[ 2 - \frac{3(x - m)}{h} + \left( \frac{x - m}{h} \right)^3 \right] + 3mx^2 \left( \frac{x - m}{h} - 1 \right) \right\}$$

Dove  $m = \cos(\theta)$  con  $\theta$  che rappresenta l'angolo di contatto tra la superficie della particella ed il liquido mentre  $h$  è un fattore geometrico calcolato come:

$$h = \sqrt{1 - x^2 - 2mx}$$

con  $x = dp/de$ , dove  $de$  rappresenta la grandezza dell'embrione.

Di conseguenza il valore della supersaturazione critica eterogenea sarà dato da:

$$S_{cr}^{het} = e^{\left[ \frac{1}{R_v T \rho_l} \sqrt{\frac{8\pi M_w^2 \tau^3}{3 k_B T \ln(\pi K_C d_p^2)}} f(m, x) \right]}$$

Note queste formule, si può dire che per aumentare l'efficienza di filtraggio occorre o lavorare sul grado di supersaturazione, e quindi elevare la pressione e/o abbassare la temperatura dei fumi o favorire il contatto tra particolato e gocce d'acqua e cioè diminuendo le dimensioni delle gocce, diminuendone la velocità o deviando il percorso dei fumi e dell'acqua.

Per lavorare in questa direzione abbiamo inserito dei riempimenti in una torre di lavaggio, che ora verranno illustrati.



### *3. Descrizione impianto sperimentale*

I meccanismi sopra indicati sono stati studiati a livello teorico ed è stato realizzato nei laboratori del DIN un impianto sperimentale per verificarne la veridicità ed i limiti sia in termini di efficienza di filtrazione che di consumi

Le caratteristiche obiettivo per il filtro sono:

- Un'efficienza di cattura del particolato maggiore del 99,9%
- Consumi energetici inferiori a 10 Wh/Nm<sup>3</sup>
- Una manutenzione ordinaria semplice che non necessiti di personale qualificato

L'impianto è quindi costituito da una caldaia a biomassa di piccola potenza mantenuta in condizioni di lavoro costanti tramite il controllo dell'acqua riscaldata. L'uscita dei fumi segue quindi due percorsi alternativi, il primo al camino ed il secondo verso il sistema di filtrazione, in questa maniera è possibile misurare la concentrazione di PM nei fumi tal quali o filtrati; sapendo questi valori è possibile valutare l'efficienza del sistema di filtrazione testato.

#### **3.1 Impianto di sperimentazione**

L'impianto di prova, realizzato per testare le configurazioni del filtro, presenta:

- a) una caldaia alimentata a mais da 25 kWt, come generatore della corrente gassosa carica di particolato;
- b) il circuito dei fumi diviso in due linee: la prima è diretta al camino (linea A di Figura 3. 3.1), la seconda permette di inviare i fumi al dispositivo di rimozione del particolato (linea B);
- c) un circuito idraulico che permette di mantenere costanti le condizioni all'interno della caldaia;
- d) la strumentazione necessaria alla gestione dell'impianto e alla regolazione delle condizioni operative;
- e) quadro elettrico per la gestione dei componenti regolabili;

f) la strumentazione di campionamento, conforme alla normativa, che permette di misurare la concentrazione di PM nei gas emessi in atmosfera.

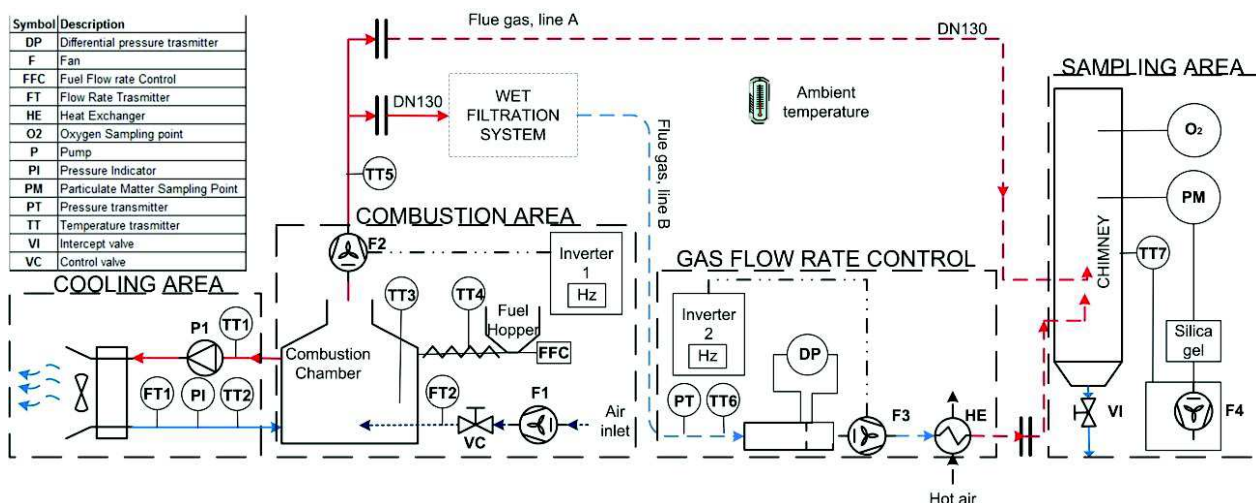


Figura 3. 3.31 - P&I dell'impianto di sperimentazione del sistema di filtrazione, completo di caldaia, circuito dei fumi (linea A e B), circuito idraulico, tutti i componenti meccanici e la strumentazione, necessari per il corretto funzionamento. Fonte: [15].

### 3.1.2 Caldaia

La caldaia utilizzata nell'impianto è il modello Risparmiola RPM 20 dell'Azienda Ecofaber alimentata durante tutti i test condotti con granella di mais.

L'immissione dell'aria avviene mediante la depressione che si crea all'interno della camera di combustione, quando si ha l'avviamento del ventilatore di estrazione. Sul tubo che porta aria alla camera di distribuzione (A), è inserita una valvola a clapè che chiusa dal proprio peso a ventilatore spento, è tale da sollevarsi ad opera della depressione interna, a ventilatore in funzione, lasciando passare il flusso d'aria, che attraverso i fori disposti radicalmente intorno al bordo superiore del braciere, giunge alla base della fiamma (B). All'interno del braciere, il combustibile solido una volta acceso il fuoco, con l'azione di aria, si sviluppa una fiamma che interessa tutta la camera di combustione (C) e qui per contatto ed irraggiamento, trasmette calore all'acqua di caldaia a contatto delle pareti laterali e posteriore della stessa camera di combustione. I prodotti della combustione, attraverso lo spazio (D) compreso tra le alette



per passaggio fumi ed il corpo caldaia superiore, giungono alla camera di recupero (E) e da qui, sempre sotto l'azione dell'aspiratore, risalendo dalla camera fumi (F) arrivano al condotto camino (G).

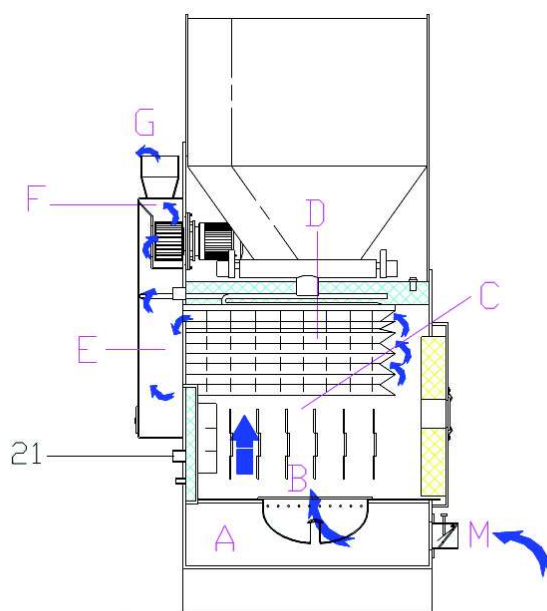


Figura 3.32 Circolazione fumi in caldaia

È importante garantire una corretta combustione in caldaia per limitare in partenza la formazione di particolato: infatti se la biomassa brucia nelle migliori condizioni operative, la concentrazione di particolato nei fumi è minimizzata., si sono determinate come condizioni di buona combustione, quando l'alimentazione è il mais, una portata di combustibile di circa 3 kg/h (impostabile direttamente dalla caldaia, regolando la velocità della coclea di alimentazione: **FCC**) e un eccesso di aria del 100%: il valore stechiometrico è pari 6 kg di aria per ogni kg di mais, per cui per determinare i valori detti va inviata una portata di aria di circa 36 kg/h, da cui deriva una portata di fumi in uscita vicino ai 40 kg/h.

La portata di aria in ingresso alla caldaia viene determinata da un ventilatore (**F1**) e regolata con una valvola di controllo (**VC**), viene poi rilevata da un trasduttore di portata massica (**FT2**): in questo modo è possibile stabilire se entra la quantità di aria corretta per realizzare l'eccesso di aria voluto.

Viene misurata la temperatura in camera di combustione con una termocoppia (TT3) sempre con lo scopo di realizzare una combustione corretta e quindi ridurre il particolato che si forma.



Costruttore	ECOFABER
Caldaia tipo	RPM20
Anno di costruzione	2005
N.F:	R0350706
Contenuto acqua	25 litri
Alimentazione	Pellet, Mais
Pressione di prova idraulica	4.5 bar
Pressione massima di esercizio	3 bar
Temperatura massima di esercizio	100°C
Potenza massima focolare	20 kW
Potenza massima utile	15 kW
Potenza minima utile	9 kW

Figura 3.33 - Caldaia Risparmiola RPM 20 della Ecofaber e relative caratteristiche . Fonte: [15]

Nel corso dell'attività di dottorato sono state testate differenti soluzioni impiantistiche. Per poter confrontare agevolmente i risultati ottenuti si è cercato di lavorare sempre nelle medesime condizioni. A tal fine la caldaia alimentata ha lavorato sempre nelle seguenti condizioni:

- 1) 3 kg/h di granella di mais
- 2) Considerando un eccesso d'aria del 100%, la portata di aria comburente è pari a 36 kg/h (misurati dall'anemometro a filo caldo posto all'ingresso dell'aria in caldaia.
- 3) Da cui il particolato totale emesso varia nelle quantità 300-350 mg/Nm<sup>3</sup>.

### 3.1.2 Circuito idraulico

[15] Il circuito idraulico consente di mantenere all'interno della caldaia le stesse condizioni di lavoro.

Per tanto il circuito presenta un radiatore con ventola che mantiene temperatura dell'acqua in caldaia (e di conseguenza la temperatura in camera di combustione) all'interno del range desiderato della caldaia: la ventola del radiatore si accende sopra un certo valore di temperatura dell'acqua in ingresso in caldaia (fissato a 55°C) e si

spegne quando la stessa misura scende sotto un altro livello di temperatura (fissato a 50°C).

Le temperature dell'acqua sono misurate con due termoresistenze (**TT1** di mandata e **TT2** di ritorno) che permettono di determinare la potenza sottratta ai fumi da parte dell'acqua, e viene monitorata anche la pressione (**PI**). L'acqua circola grazie alla pompa (**P1**).

Per evitare un eccessivo aumento della temperatura dell'acqua nel circuito, la caldaia è dotata anche di un sistema di sicurezza che assorbe e scarica calore in tempi brevi. Nella parte superiore della caldaia vi è infatti uno scambiatore di calore in cui può circolare acqua fredda derivante direttamente dalla rete idrica e scaricata in fogna.

### 3.1.3 Circuito dei fumi

I fumi in uscita dalla caldaia possono percorrere due strade alternative:

- essere inviati direttamente al camino;
- essere fatti passare in un circuito che contiene il sistema di filtrazione e successivamente inviati a camino ed emessi in atmosfera.

A permettere la deviazione dei fumi in una linea rispetto l'altra, sono dei collegamenti flangiati lasciati aperti o chiusi con piattelli ciechi a seconda dei diversi casi.

Sul ramo di filtrazione dei fumi, verso la torre di lavaggio, sono presenti una serie di componenti e la strumentazione che permettono di regolare e controllare il flusso in maniera corretta.

In particolare sono presenti degli aspiratori centrifughi (**F3**), disposti in serie, aventi i motori collegati allo stesso inverter, così che questi lavorino alla stessa velocità: questi ventilatori realizzano il tiraggio dei fumi, che nel circuito di by-pass subiscono perdite di carico, per farli arrivare al camino.

Segue poi uno scambiatore (**HE**) che lavora in controcorrente per scaldare i fumi ed evitare la loro condensazione. Infatti la torre di lavaggio raffredda i fumi che, essendo saturi di acqua, cominciano a condensare e la condensa arriverebbe al sistema di campionamento dei fumi compromettendo la prova: si riscaldano allora i fumi utilizzando aria riscaldata da due sverniciatori industriali (per quanto riguarda le campagne sperimentali questi entrano in funzione solo per quelle effettuate nel periodo invernale).

Infine c'è la canna fumaria che deve consentire l'uscita dei fumi da entrambi le linee; nella parte inferiore vi è uno scarico per la condensa (**VI**) per evitare di umidificare i fumi. Il camino è tale da permettere anche il posizionamento del sistema di campionamento dei fumi.

Per quanto riguarda la strumentazione in questo circuito sono presenti:

- Un anemometro a filo caldo per la misura della portata di aria in ingresso (**FT2**) in caldaia

- una termoresistenza (**TT5**) per misurare la temperatura dei fumi subito dopo la ventola della caldaia, in corrispondenza della deviazione della linea dei fumi, e per conoscere velocemente l'andamento della combustione;
- un sistema misura della portata a diaframma per la misura della portata dei fumi a valle di sistema di pulizia; per funzionare correttamente si realizza una perdita di carico concentrata nel diaframma, misurata con un manometro differenziale (**DP**), insieme alle misure della pressione assoluta dei fumi (**PT**) e di temperatura (**TT6**), legate alla densità, si ricava quindi la misura della portata, in massa e volumetrica;
- al camino viene misurata nuovamente la temperatura con una termocoppia (**TT7**), sia nel caso in cui i fumi siano inviati direttamente a camino, sia che siano stati deviati al filtro.

Molto importante per la gestione dell'impianto è il monitoraggio della temperatura nel condotto di alimentazione dalla coclea alla camera di combustione, realizzata con una termocoppia (**TT4**): questa permette di garantire che all'interno della caldaia la combustione sia avvenendo in condizioni quanto più stechiometriche: si tratta infatti dell'unica via di ingresso di aria all'interno della camera di combustione oltre alla valvola a clapet. È quindi necessario controllare che la temperatura nel condotto sia compresa nel range 20 e i 30°C, range di buon compromesso che tiene in considerazione anche qualche perdita (accettabile); se la temperatura è maggiore significa che i fumi trovano nella coclea una via preferenziale di uscita perché la camera è in sovrappressione e la portata dei fumi elaborata a valle cala, se invece la temperatura cala significa che la camera è in depressione e altra aria sta entrando da quel punto, per cui la portata elaborata a valle cresce (e ci si allontana dalle condizioni stechiometriche ricercate).

Questa temperatura, diretta conseguenza delle variazioni di portata soprattutto in fase di avviamento e di cambiamento delle condizioni operative, può essere regolata gestendo la velocità di rotazione della ventola della caldaia, oppure quella degli aspiratori: in entrambi i casi si agisce in modo da mantenere costante la portata di fumi elaborata.

### 3.2 LabView e acquisizione dei segnali

Per poter procedere all'acquisizione dei segnali inviati dai differenti strumenti si è adottata l'attrezzatura hardware Compact-Rio (o C-Rio) della National Instruments

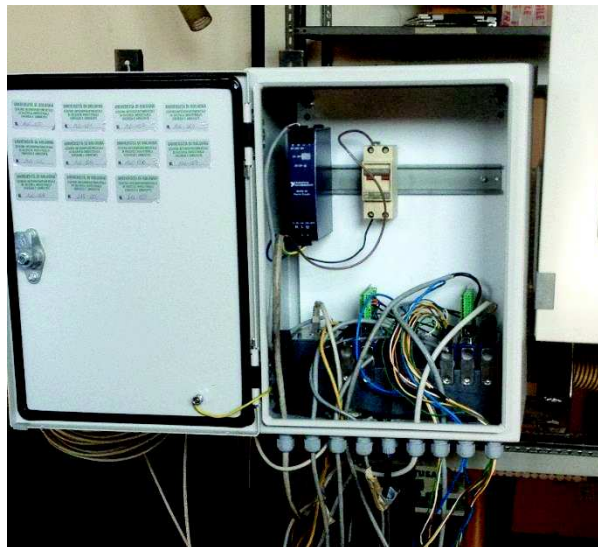


Figura 3.34 Quadro elettrico hardware Labview

Questo è un sistema di monitoraggio e gestione dell'impianto. Si tratta di un dispositivo informatico, assemblato in moduli, a cui sono collegati sonde di temperatura, pressione, quadro elettrico, che in generale consente di controllare e gestire un impianto, eseguendo funzioni in automatico o anche generare allarmi. A sua volta il cRIO infatti è collegato ad un computer tramite un cavo ethernet.

In questa maniera tramite il software scritto in LabView è possibile visualizzare e registrare i dati dalla strumentazione dell'impianto oltre controllare l'impianto stesso (es accensione ventilatore radiatore per controllare la temperatura di funzionamento della caldaia). Riporto di seguito la Figura 3. di controllo realizzata con Labview, denominata "Front Pannel".

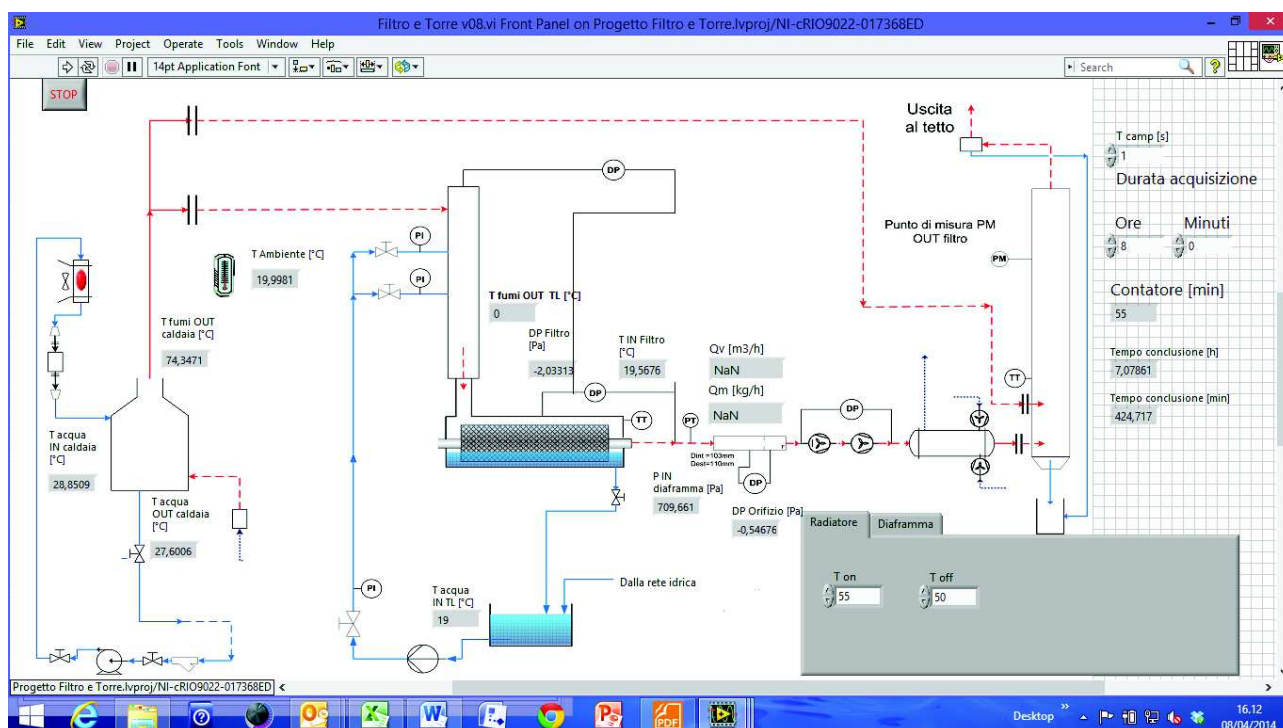


Figura 3.5 Figura 3. 1 Front-panel del sistema di acquisizione "Filtro e Torrev08.vi"

Il Front-Panel costituisce l'interfaccia attraverso cui si lavora normalmente, la parte "grammaticale" del programma si trova nel Block diagram a cui si accede solo per modifiche al programma.

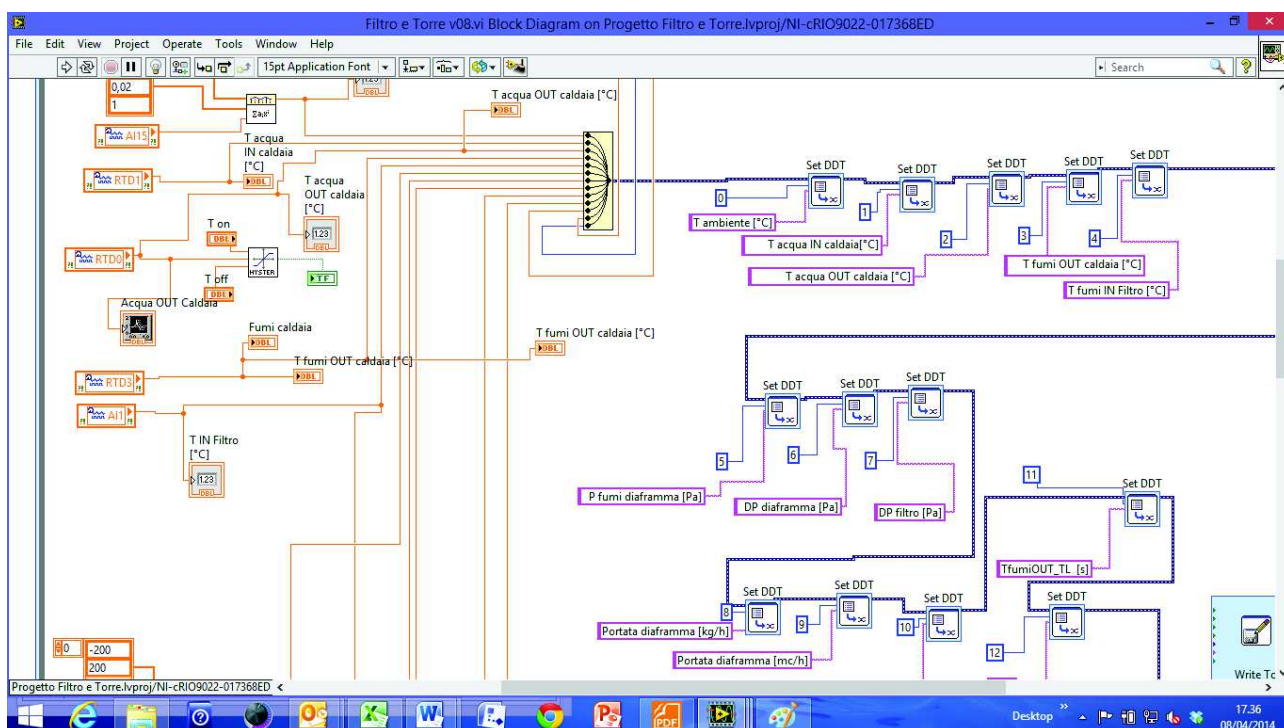


Figura 3.6 Porzione del block diagram

Il compact Rio acquisisce segnali di diversa natura:

1. Termocoppie
2. Termoresistenze
3. Segnali in corrente (0-20ma)

### Segnali in corrente

I segnali acquisiti in corrente vanno convertiti in un secondo passaggio tramite un'interpolazione che si può eseguire con la seguente "architettura"

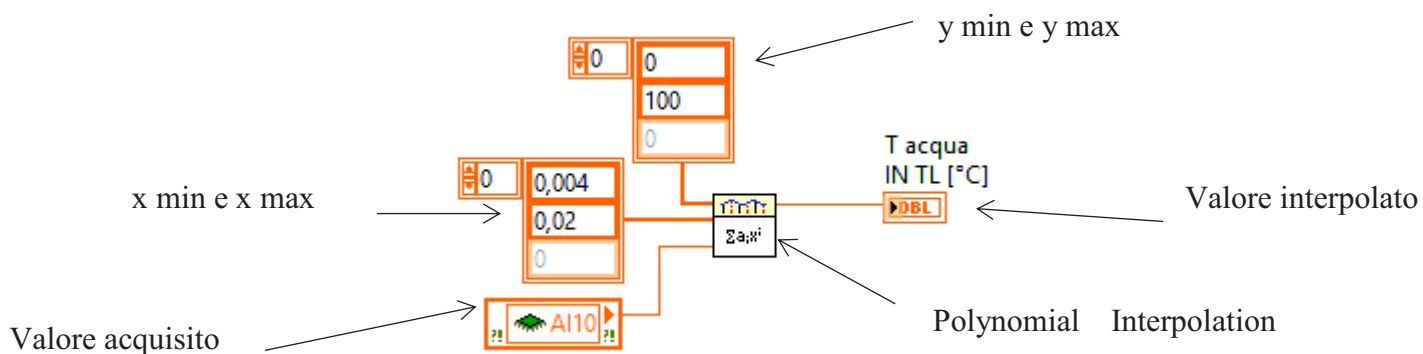


Figura 3.2 Particolare del Block Diagram relativo all'acquisizione di un segnale in corrente



Il segnale acquisito varierà sempre fra 4 e 20 mA (0.004 e 0.02 in Figura 3. 2), cui corrisponderà un valore minimo e massimo della variabile misurata: in Figura 3. 2 il minimo è 0 ed il massimo è 100; i valori minimo e massimo possono essere impostati dalla casa produttrice dello strumento senza possibilità di modificarli o possono invece essere variabili

Nota all'acquisizione di segnali in corrente: tutti i segnali in corrente che attualmente vengono acquisiti, dal relativo modulo, sono passivi, ovvero privi di alimentazione. Alimentando la morsettiera in corrente continua, CC, secondo quanto riportato nel relativo manuale di istruzioni è possibile dare corrente attraverso la morsettiera stessa.

Nel caso che il segnale acquisito sia attivo, ovvero rechi anche una tensione, non è necessario alimentare la morsettiera in alcuna maniera ma si devono ponticellare tra loro i due ingressi della CC.

La stessa morsettiera NON accetta contemporaneamente segnali attivi e passivi.

L'unico segnale in uscita dai moduli riguarda il relè NI9481 che controlla l'alimentazione l'accensione e lo spegnimento della ventola del radiatore

Nella Figura 3.5 Figura 3. 1 Front-panel del sistema di acquisizione "Filtro e Torrev08.vi" sono presenti diversi punti di input:

- $T[s]$ , è il periodo con cui il sistema c-Rio si aggiorna. Considerando che le variazioni nel nostro impianto sono relativamente lente, un periodo di 1 s si ritiene adatto a dare un'immagine fedele del comportamento dell'impianto. Se si desidera un periodo differente è necessario modificarlo prima di lanciare il programma, una volta lanciato il programma il periodo di campionamento verrà mantenuto fino a quando il programma non viene fermato
- Durata dell'acquisizione, necessaria sia per campionamenti lunghi che brevi. Modificare la durata complessiva del campionamento prima di lanciare il programma altrimenti il programma proseguirà con i valori che aveva al momento dell'avvio. Per avere dati significativi è necessario che la durata di campionamento coincida con quella di funzionamento della centralina Tecora
  - Nei campionamenti ambientali si imposterà la durata pari a 24 ore e 0 minuti
  - Per le emissioni da caldaia/filtro 0 ore e 15 minuti.
- Nell'angolo inferiore destro è possibile modificare il range del radiatore.



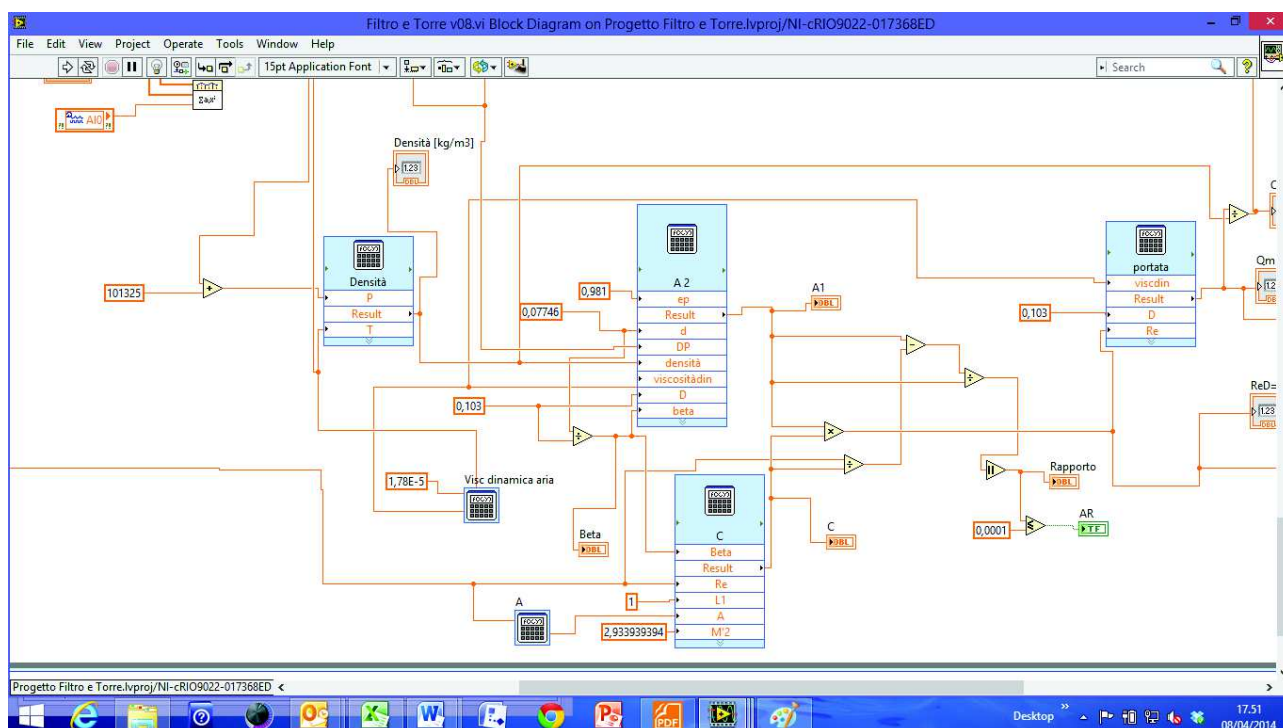


Figura 3. 4 Particolare del Block Diagram riguardante il calcolo della portata al diaframma con metodo iterativo (norma 1068)

Fino ad ora si è considerata solo l'acquisizione e la visualizzazione dei dati; di fondamentale importanza è però salvare i dati di campionamento in maniera tale da avere una rappresentazione nel tempo di quello che succede nell'impianto.

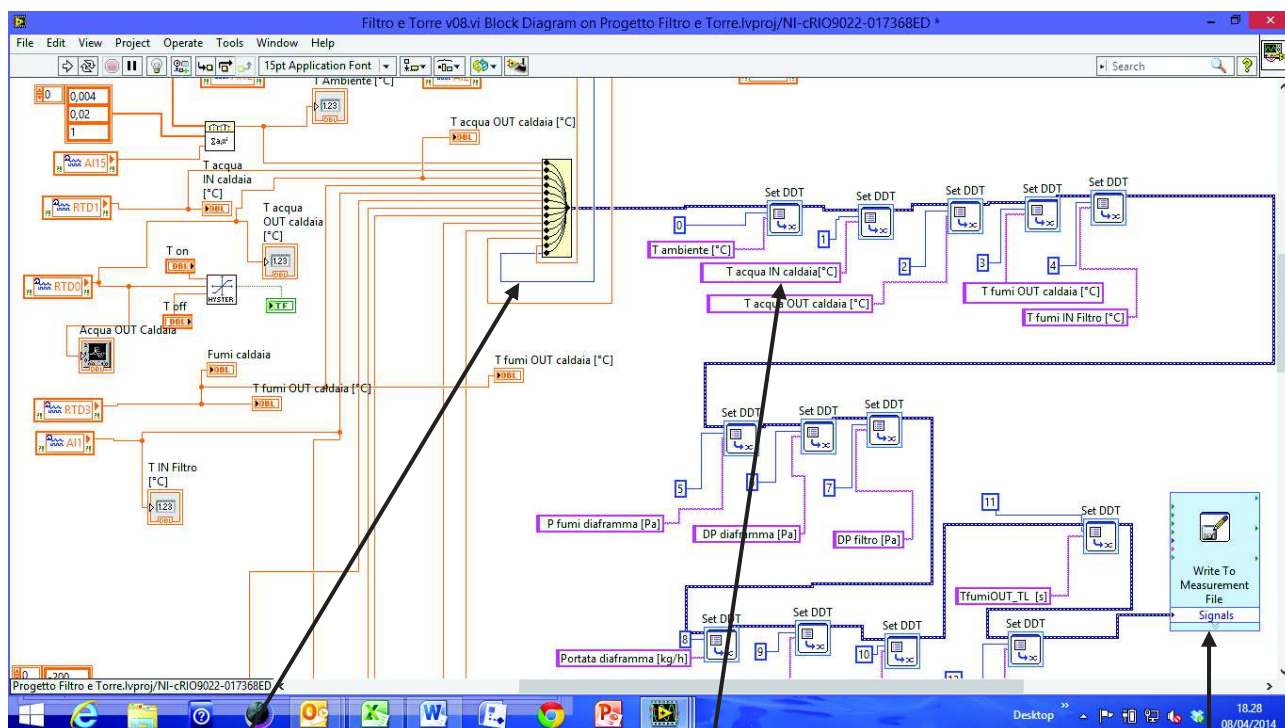


Figura 3. 5 Particolare del Block Diagram riguardante il salvataggio dei dati

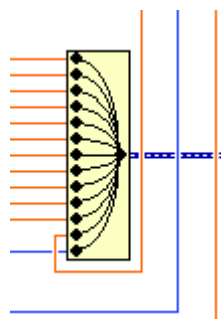


Figura 3. 6 Particolare, strumento "Merge Signals"

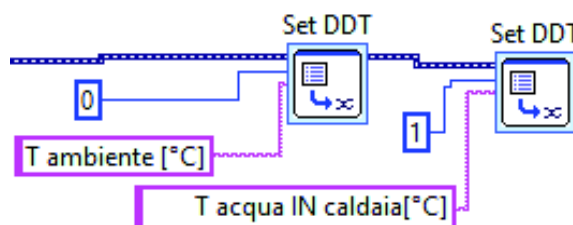


Figura 3. 8 Particolare Strumento "Set Dynamic Data Attributes"

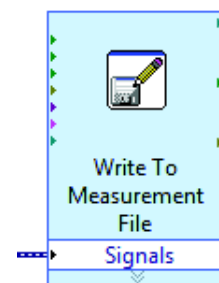


Figura 3. 7 Particolare strumento "Write to Measurement File"

L'acquisizione è resa possibile tramite lo strumento "Write to Measurement File" che salva i dati in un file unico; accendendo alle sue proprietà (cliccandoci sopra con il 2° bottone del mouse e selezionando Properties) si aprirà la Figura 3. 9.

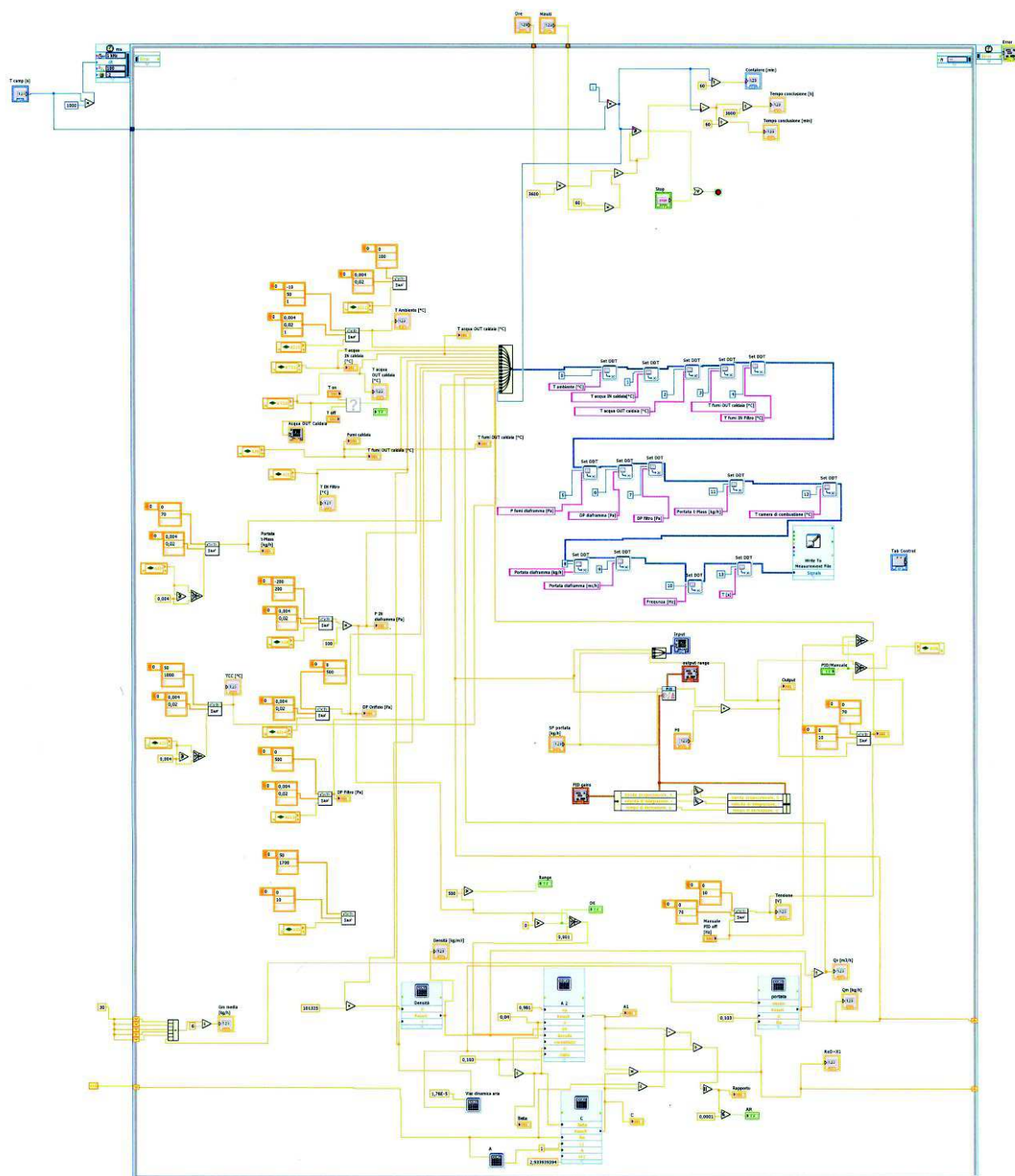


Figura 3.27 Rappresentazione in linguaggio di programmazione del software (Block Diagram) realizzato con Labview per la gestione dell'impianto

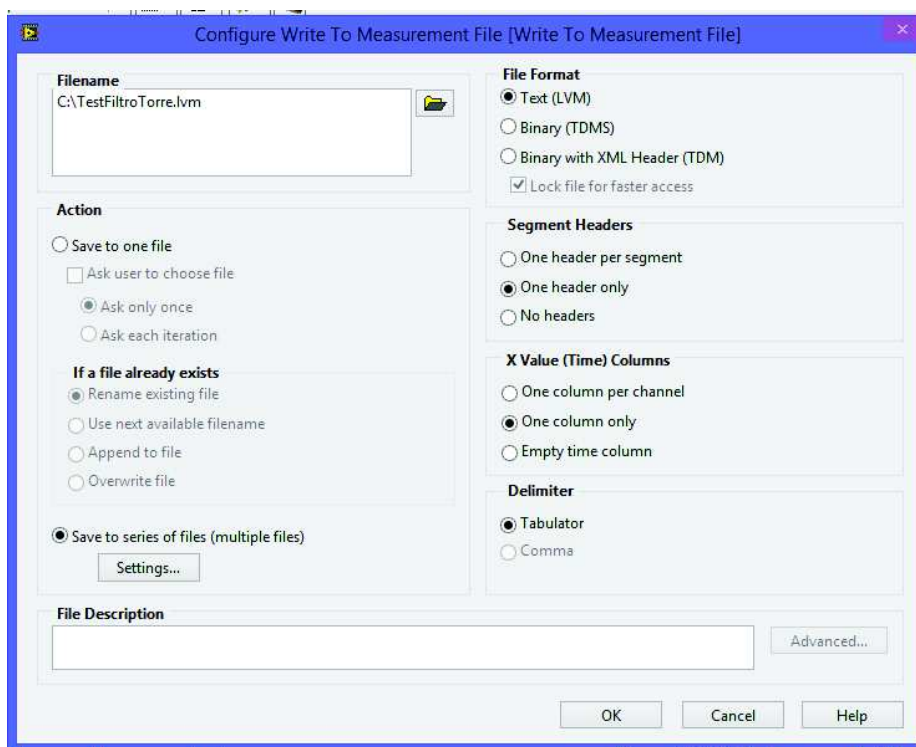


Figura 3. 9 Menu di configura 3.zione di “Write to Measurement File”

Il file viene salvato nel disco fisso del c-Rio; questo rende possibile svincolare il funzionamento del sistema di Acquisizione da quello del PC che si può quindi disconnettere (opzione fondamentale nel caso di lunghi campionamenti come quelli ambientali). Il PC diventa quindi solo uno strumento per avviare il programma e di interfaccia per visualizzare le letture, demandando alla CPU del c-Rio tutta la parte di calcolo.

Riassumendo i file verranno tutti salvati nel disco rigido **C** del c-Rio con il nome “TestFiltroTorre” seguito dalla data e ora; ad esempio: **TestFiltroTorre\_14-03-13\_1626\_lvm**.

Per collegare tutti i valor misurati allo strumento “Write to Measurement File” bisogna prima raccogliarli

tramite lo strumento “Merge Signals” in Figura 3. 6 che raccoglie tutti i segnali; l’ordine, dall’alto verso il basso, con cui i vari segnali vengono raccolti sarà anche l’ordine con cui i dati vengono divisi in “Write to Measurement File”: per cui il primo segnale sarà il valore che compare nella prima colonna e così via.



[illegible]

A questo punto si è data una rappresentazione sufficientemente fedele del software di acquisizione dati.

[illegible]

Grazie allo strumento di Excel “importa dati da testo” sarà possibile quindi importare i dati dal file di testo ed ottenere un foglio Excel elaborabile.

Figura 3. 12 Dati importati in Excel

### 3.3 Strumenti di misura

Nell'impianto sperimentale realizzato si è resa necessaria l'installazione di strumenti di misura per il continuo monitoraggio dell'impianto. Nel diagramma P&I del precedente capitolo è stata già indicata sia la collocazione di tali strumenti che le rispettive grandezze da essi misurate. In questo capitolo vengono prima descritti tutti i trasduttori installati nell'impianto sperimentale. La maggior parte della strumentazione appartiene a due marche distinte: "Endress & Hauser" ed "General Electric" nel seguito, quando occorre, le si indicherà tramite le sigle "EH" ed "GE" rispettivamente.

#### 3.3.1 Portata di aria in ingresso alla caldaia

Nel processo di combustione di biomassa solida, uno dei parametri di maggiore importanza è l'eccesso di aria, già definito nel Capitolo 1 come "percentuale di aria in eccesso rispetto all'aria stechiometrica". Per rilevare la portata in massa di aria in ingresso alla camera di combustione è stato installato un trasduttore di portata massica per gas. Lo strumento è il *Proline t-mass 65* prodotta da Endress & Hauser (Foto 3. 1).

Il principio su cui questo strumento si basa è quello dell'anemometro a filo caldo. Un filamento riscaldato da una corrente elettrica, si porterà ad una temperatura che dipenderà dalla temperatura del fluido nel quale è immerso, dalla configurazione geometrica e dal coefficiente di scambio termico tra il filo ed il fluido, coefficiente che,



a sua volta, dipende dalla velocità relativa del fluido rispetto al filamento, secondo la relazione:

$$Q_L = \Delta T \cdot [K + (2\pi \cdot K \cdot c_v \cdot \rho \cdot v \cdot d)]^{0.5}$$

Dove:

$Q_L$	Calore sottratto al filamento	$\rho$	Densità del fluido
$\Delta T$	Differenza di temperatura tra filo e fluido	$v$	Velocità del fluido
$K$	Conducibilità termica del fluido	$d$	Diametro del filamento
$c_v$	Calore specifico a volume costante del fluido		

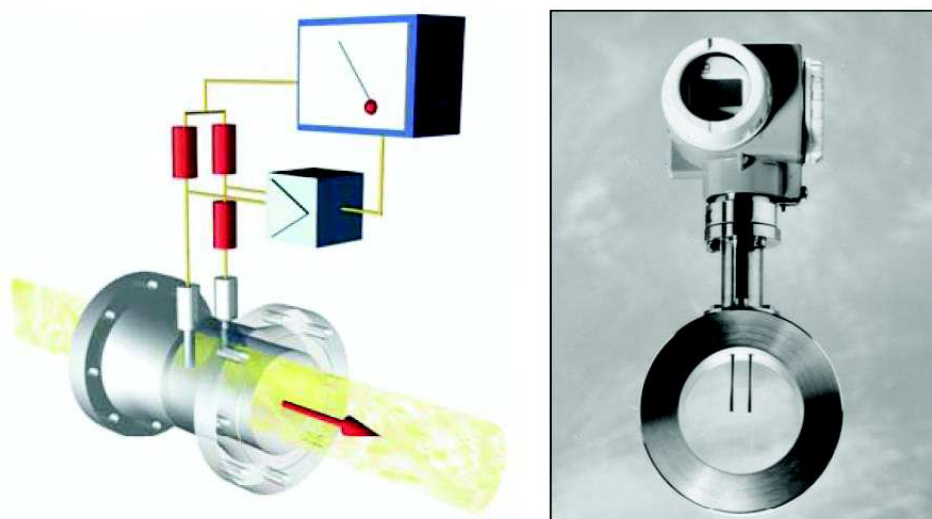


**Foto 3. 1 Misuratore di portata EH Proline t-mass 65**

In un anemometro a filo caldo si misura la velocità del fluido rilevando il valore della resistenza elettrica del filamento percorso da una corrente elettrica costante; esistono varianti commerciali in cui un circuito di regolazione varia l'intensità di corrente in modo da mantenere la resistenza (e quindi la temperatura) del filo ad un valore costante e la misura della velocità si ottiene risalendo al valore della corrente. Tra i maggiori vantaggi che questo sistema presenta ci sono: assenza di parti mobili, perdite di carico minime, buona prontezza di risposta, alta sensibilità, adattabilità ad un'ampia gamma di condotti, temperature e pressioni; tutto questo a fronte di un'alta complessità dello strumento, calibrazione accurata, utilizzo per soli fluidi gassosi (con basso livello di contaminazione) ed alta sensibilità alle condizioni di installazione.

Il particolare modello installato prevede che il flusso d'aria passi su due termoresistenze, delle quali una ha la funzione convenzionale di rilevatore di temperatura, l'altra è utilizzata come elemento riscaldante. La prima rileva la temperatura del gas mentre la seconda è mantenuta ad una sovratemperatura costante rispetto a quella del fluido, variando la corrente elettrica che fluisce in essa. Più alta è la portata di gas che investe la termoresistenza riscaldata, maggiore sarà la quantità di calore che ad essa verrà sottratta e, di conseguenza, maggiore sarà la corrente necessaria a mantenere costante la differenza di temperatura tra i due sensori.

La Figura 3.2 riporta uno schema in cui si vedono i resistori (in rosso) e l'amplificatore (in verde) e la vista frontale dello strumento dalla quale si vedono i 2 sensori di temperatura.



**Figura 3.28 Principio di funzionamento e vista frontale**

Nell'impianto il t-mass 65 è stato montato sul fianco della caldaia.

Secondo quanto riportato dal manuale di installazione sono stati previsti sia a monte che a valle opportuni tratti rettilinei per avere un flusso il più possibile uniforme:

Monte)  $15 \times 50 = 750 \text{ mm}$ .

Valle)  $2 \times 50 = 100 \text{ mm}$ .

Sia a monte che a valle i condotti sono sempre di diametro D50.

Un opportuno sistema elettronico integrato provvede a fornire in uscita un segnale analogico in corrente a 4÷20 mA, che viene inviato al sistema di acquisizione. Il segnale trasportato è “attivo” per cui bisognerà tenerne conto all’atto del cablaggio con il sistema di acquisizione, nel nostro caso della National Instruments.

### 3.3.2 Portata dei fumi

Per misurare la portata dei fumi di combustione nel circuito di campionamento è stato montato un diaframma in ottone in un tubo in plexiglas posto a valle del carter del filtro. Data la natura estremamente variabile (es temperatura e umidità) del fluido da misurare si è optato per una misura di portata tramite diaframma in quanto trattasi di una soluzione decisamente più flessibile e robusta.

Il diaframma realizza una perdita di carico concentrata tramite la quale è possibile risalire alla velocità del fluido che attraversa il diaframma stesso; nota la velocità e la sezione di passaggio dei fumi (diametro interno del condotto) è facile determinare la portata volumetrica dei gas circolanti.

Per riuscire a determinare la portata massica è sufficiente moltiplicare la portata volumetrica determinata per la densità del fluido; la densità stessa è però funzione di altri due fattori, ovvero temperatura e densità, che sono quindi da misurare.

La formula seguente mostra la dipendenza della densità dalla pressione P e dalla temperatura T; nella formula P e T sono espressi rispettivamente in Pascal (Pa) e gradi celsius (°C).

$$\rho = \frac{P * (273.15 + 20)}{101325 * (273.15 + T)} * 1.02$$

Ricapitolando le misure da effettuare per determinare la portata massica dei fumi sono:

- 1) Differenza di pressione al diaframma (od orifizio tarato)
- 2) Pressione assoluta del gas
- 3) Temperatura del gas

### 1) Pressione differenziale al diaframma



Foto 3. 2 Diaframma in ottone montato su tubo in plexiglass

Come prescritto dalla norma UNI ISO 5167-2 “Misurazione della portata dei fluidi mediante dispositivi a pressione differenziale inseriti in condotti a sezione circolare piena - Diaframmi”, a un diametro a monte e a mezzo diametro a valle del diaframma sono state collocate le prese di pressione (Figura 3.).

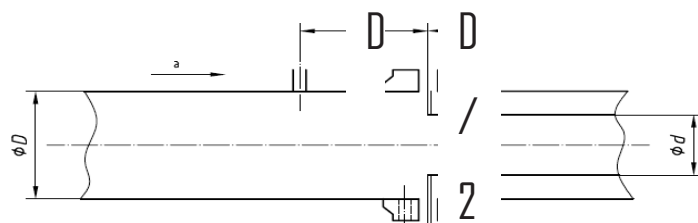


Figura 3.29 Collocazione del diaframma secondo la norma UNI ISO 5167-2

Le prese di pressione indicate vanno in ingresso al trasmettitore di pressione differenziale GE *LP 1000* della General Electronics, riportato in Foto 3. 3, che converte la differenza di pressione  $\Delta p$  tra monte e valle nel diaframma in un segnale in corrente.

Successivamente il software, in base a questo segnale, a quello di una termoresistenza e al valore della pressione assoluta dei fumi, è in grado di calcolare la portata in massa dei fumi.

Lo strumento assicura un campo di funzionamento compreso nel range 0-5 mbar, con una pressione di linea massima pari a 20 bar ed una temperatura di funzionamento di 50°C.

Lo strumento fornisce un segnale in uscita a 4÷20 mA del tipo passivo, per cui è necessario alimentare lo strumento mediante il sistema di acquisizione.

Per tutte le informazioni circa installazione ed esercizio si rimanda al manuale relativo allegato

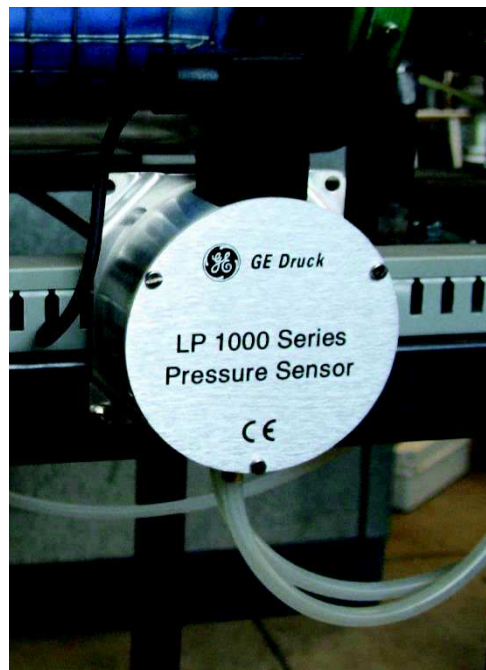


Foto 3. 3 Misuratore di pressione differenziale LP1000

Si consideri la sezione 1 di Figura 3.2, di diametro D e la sezione 2 di diametro d, e si imposti l'equazione di continuità secondo quanto segue:

$$\rho_1 w_1 A_1 = \rho_2 w_2 A_2$$

Dall'equazione di Bernoulli, ipotizzando la presenza di un condotto orizzontale attraversato da un fluido incompressibile, risulta:

$$\frac{p_1}{\rho_1 g} + \frac{w_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho_2 g} + \frac{w_2^2}{2g}$$

Combinando le due equazioni e definendo il rapporto di strozzamento  $\beta = \frac{d}{D}$ , si ricava:

$$Q_m = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p \rho}{1 - \beta^4}}$$

Generalizzando l'equazione e considerando un fluido comprimibile, si introduce il coefficiente di comprimibilità  $\varepsilon$  secondo quanto segue:

$$\varepsilon = 1 - \left( 0.351 + 0.256\beta^4 + 0.93\beta^8 \right) \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} \right]$$

In base a tali considerazioni la portata in massa di fumi che attraversa il condotto è data dalla seguente espressione:

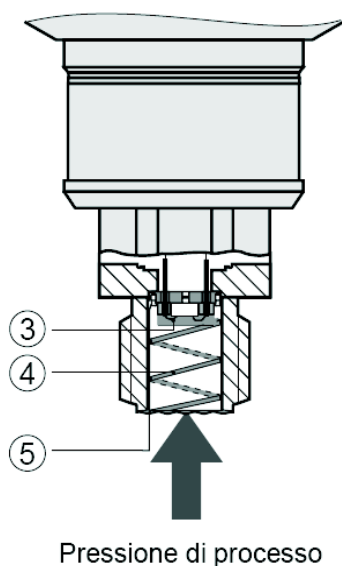
$$Q_m = \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p \rho}{1 - \beta^4}}$$

## 2) Pressione assoluta dei fumi

Il valore di pressione assoluta dei fumi è una delle misure necessarie per riuscire a calcolare la portata in massa dei fumi partendo dalla portata volumetrica misurata dal diaframma. A tale scopo sul condotto fumi va installato un sensore di pressione EH Cerabar MPMP 51 (Foto 3. 4).



In questa configurazione (Figura ) la pressione di processo flette il diaframma di separazione in materiale metallico, al di là del quale un liquido di riempimento trasmette la pressione a un circuito piezoresistivo, costituito da un cilindretto in polisilicone sul quale sono applicati degli estensimetri realizzati in silicio monocristallino (estensimetri semiconduttori). La tensione di uscita dalle resistenze, proporzionale alla pressione, viene quindi misurata e quindi elaborata. Data l'elevata costante elastica del sistema, questo tipo di strumento è adatto per misure di pressioni variabili con estrema rapidità, il tempo di risposta garantito dalla casa produttrice è di 180 ms.



**Figura 3.30 Cerabar, principio di funzionamento. Elemento di misura (3), Canale con liquido di riempimento (4), Diaframma di separazione (5).**



Il campo di misura di questo strumento è 0.1÷400 bar, l'alimentazione in corrente continua è garantita dal sistema di acquisizione. L'uscita è analogica a 4÷20 mA.

- 3) La misura di temperatura è invece consentita da una Termocoppia modello K. Il cui funzionamento sarà trattato insieme agli altri sistema di misura della temperatura di seguito

### 3.3.3 Portata d'acqua

Un'altra misura imprescindibile in questo impianto sperimentale è quella della portata d'acqua circolante nell'impianto. Sul ramo di ritorno della caldaia, per ridurre al minimo gli stress termici, è stato installato il misuratore di portata elettromagnetico *EH Proline Promag 10 P40* (Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.).



Questa tipologia di misuratori sfrutta la legge sull'induzione di Faraday, che afferma che un conduttore che si muove in un campo magnetico genera una tensione pari a:

$$V_e = B \cdot L \cdot v$$

**Foto 3. 5 Misuratore di portata EH Proline Promag 10 P40**

In cui:

V <sub>e</sub>	Tensione indotta	L	Spazio tra gli elettrodi nel condotto
di misura			

B	Intensità del campo magnetico	v	Velocità del conduttore
---	-------------------------------	---	-------------------------

Nel Proline Promag un campo magnetico costante è generato da due bobine collocate ai lati del condotto in posizione diametralmente opposta. Due elettrodi posti nel condotto rilevano la tensione indotta (proporzionale alla velocità del fluido) che viene trasmessa all'amplificatore.



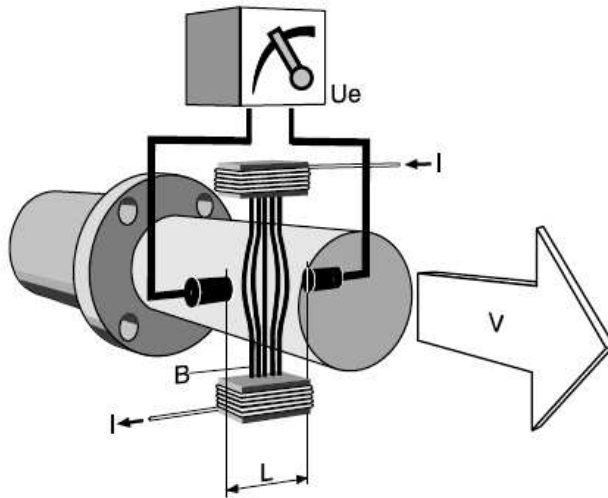


Figura 3.31 Principio di funzionamento del misuratore di portata elettromagnetico

Essendo nota la sezione trasversale  $A$  del condotto, è presto calcolata la portata volumetrica  $Q_v$ :

$$Q_v = v \cdot A = \frac{V_e}{B \cdot L} \cdot A$$

Moltiplicando  $Q_v$  per la densità del liquido  $\rho$  si ottiene la portata in massa d'acqua.

In Figura si vede che un elettrodo di riferimento montato in serie garantisce che sensore e fluido abbiano uguale potenziale elettrico, condizione necessaria perché la misura sia affidabile. Un ulteriore elettrodo è adibito al controllo della presenza di bolle all'interno del condotto; per evitare accumulo d'aria nella parte superiore del tubo, le istruzioni precisano che lo strumento vada installato orizzontalmente, in un punto che non sia il più alto dell'impianto. Inoltre deve essere installato su un tratto rettilineo a sezione costante che abbia non meno di cinque diametri a monte e due a valle.

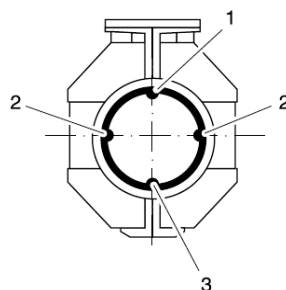


Figura 3.32 Sezione trasversale con elettrodo di controllo del tubo vuoto (1.), elettrodi di misura (2.) ed elettrodo di riferimento (3.)

Il fluido di cui si voglia misurare la portata con il Proline Promag deve avere una conducibilità minima pari a 50  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , si parla quindi di acqua potabile, acque industriali, acque reflue e fanghi di depurazione. La velocità del fluido deve essere minore di 10 m/s, la sua temperatura inferiore ai 60 °C e la pressione minore di 16 bar. In uscita fornisce un segnale in corrente a 4÷20 mA con un errore massimo di  $\pm 5 \mu\text{A}$ . L'utilizzo di questo misuratore di portata comporta i vantaggi di una semplice installazione, un elevato grado di precisione della misura, perdita di carico nulla e costo relativamente basso.

### 3.3.4 Misure di temperatura

Come illustrato dal P&I, le misure di temperatura presenti nell'impianto sono in tutto 9:

- 4 sulla linea dei fumi
  - Temperatura dei fumi immediatamente all'uscita della caldaia, termoresistenza Pt100
  - Temperatura dei fumi all'ingresso del Carter, dopo la torre di lavaggio, termocoppia tipo K
  - Temperatura dei fumi circolante nel diaframma, termocoppia tipo K
  - Temperatura dei fumi all'ingresso del camino dopo il riscaldamento per mezzo dello scambiatore, termocoppia tipo K
- 3 sulla linea dell'acqua
  - Temperatura acqua in uscita dalla caldaia nel circuito idraulico (circuito radiatore), termoresistenza Pt100
  - Temperatura dell'acqua in ingresso in caldaia dal circuito di controllo della temperatura (circuito radiatore), termoresistenza Pt100.
  - Temperatura dell'acqua in ingresso in torre di lavaggio, termoresistenza
- 1 per la temperatura ambiente
- 1 per la temperatura nella camera di combustione, termocoppia tipo D

Si è scelto di utilizzare dei sensori a termoresistenza, che si basano sul fenomeno per il quale la resistività di un conduttore varia con la sua temperatura secondo la legge:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t)$$

Dove  $R_t$  è la resistenza alla temperatura  $t$ ,  $R_0$  è la resistenza a  $0^\circ\text{C}$  ed  $\alpha$  rappresenta il *coefficiente di temperatura* del materiale. Quest'ultimo coefficiente non è però costante, ma varia con la temperatura. Il *coefficiente medio di temperatura* è definito dalla relazione:

$$\alpha = \frac{R(100^\circ\text{C}) - R(0^\circ\text{C})}{100^\circ\text{C} \cdot R(0^\circ\text{C})}$$

Il coefficiente così trovato può dunque essere impiegato nella precedente relazione al fine di individuare la temperatura alla quale opera il sensore.

L'elemento sensibile di questo tipo di trasduttori è costituito da un filamento annegato in un elemento in vetro o in porcellana. Un gran numero di materiali potrebbero essere impiegati per realizzare termoresistenze, ma per l'impiego pratico è bene che la resistenza dell'elemento sensibile vari notevolmente e linearmente con la temperatura, che le caratteristiche siano stabili, che sia alta la duttilità e la resistenza meccanica, che sia alta la resistività elettrica in modo da avere termometri con elevata resistenza (e quindi sensibilità) senza dover ricorrere a filamenti troppo lunghi. Detto ciò, i materiali che meglio si prestano a costituire l'elemento sensibile di una resistenza risultano essere il platino e, meno costosi, il nichel ed il rame. Per quanto riguarda le termoresistenze in esame, il filamento è realizzato in platino e presenta una resistenza pari a  $100\ \Omega$  a  $0^\circ\text{C}$ , da cui la dicitura *PT 100* utilizzata nella norma DIN EN 60751. Piuttosto che utilizzare il coefficiente medio  $\alpha$  calcolato tra  $0$  e  $100^\circ\text{C}$ , si utilizzano i valori tabulati della resistenza in funzione della temperatura indicati dalla normativa DIN IEC 751. In Figura 3.33 Valori della resistenza in funzione della temperatura per filamenti di platino. Norma DIN IEC 751. si riporta un estratto di tali tabelle inserite nella normativa. Tuttavia non sarà necessario ricorrere a tali valori poiché il trattamento dei dati verrà effettuato da un apposito hardware descritto in seguito.

Tali strumenti vengono impiegati ampiamente nell'industria essendo caratterizzati da elevata precisione, eccellente stabilità a lungo termine e dalla possibilità di trasmissione del segnale per lunghe distanze (non necessitano cavi auto-compensati come le

termocoppie). Le termoresistenze sono però molto delicate e data la loro fragilità non possono essere utilizzate nella forma originaria ma devono essere inserite in una guaina protettiva, montata su un portasonde atto a resistere alle condizioni ambientali.

### **DIN IEC 751** **Temperature/Resistance Table for Platinum Sensors**

°C	Ω	°C	Ω	°C	Ω	°C	Ω
-200	18.52	20	107.79	240	190.47	460	267.56
-195	20.68	25	109.73	245	192.29	465	269.25
-190	22.83	30	111.67	250	194.10	470	270.93
-185	24.97	35	113.61	255	195.91	475	272.61
-180	27.10	40	115.54	260	197.71	480	274.29
-175	29.22	45	117.47	265	199.51	485	275.97
-170	31.33	50	119.40	270	201.31	490	277.64
-165	33.44	55	121.32	275	203.11	495	279.31
-160	35.54	60	123.24	280	204.90	500	280.98
-155	37.64	65	125.16	285	206.70	505	282.64
-150	39.72	70	127.08	290	208.48	510	284.30
-145	41.80	75	128.99	295	210.27	515	285.96
-140	43.88	80	130.90	300	212.05	520	287.62

**Figura 3.33 Valori della resistenza in funzione della temperatura per filamenti di platino. Norma DIN IEC 751.**

La norma DIN IEC 751 fornisce anche indicazioni riguardo le tolleranze ammissibili per le termoresistenze Pt100, dividendole tra due classi: una classe A in cui sono ammessi errori pari a  $\pm(0.15+0.002T)$ , ed una classe B con errori massimi di  $\pm(0.3+0.005T)$ , essendo T la temperatura da misurare. Da queste relazioni deriva il seguente diagramma estratto dalla norma (Figura ).

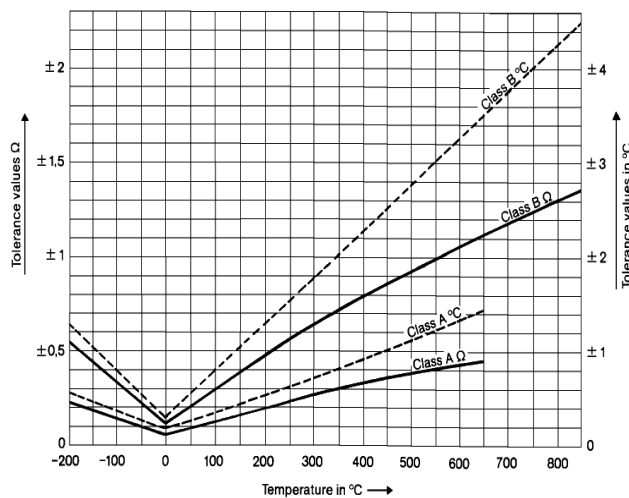


Figura 3.34 Tolleranze delle PT100. Norma DIN IEC 751

### Temperatura dei fumi

La prima misura di temperatura dei fumi viene effettuata immediatamente a valle della ventola della caldaia, in corrispondenza del tee di deviazione dei fumi nel circuito di test e di bypass.

Questa misura serve innanzitutto per conoscere la temperatura dei fumi in uscita dalla caldaia e la sua lettura consente di conoscere in maniera rapida qual è l'andamento della combustione: dato molto importante lungo tutte le prove ma in particolare durante i transitori di avvio.

Allo scopo viene utilizzata la termoresistenza EH *Omnigrad T TR24*, riportata in Foto 3.6.



Foto 3. 6 EH Omnigrad T TR24

Il campo di applicazione di misura di questo strumento va da  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $500^{\circ}\text{C}$ , il che rende il suo campo di applicazione pressoché universale. Nell'armatura è incorporato un trasmettitore elettronico integrato *iTEMP PCP TMT 181* con uscita analogica in corrente tra 4 mA e 20 mA, ideale per l'interfacciamento con il sistema di acquisizione dati.



Foto 3. 7 Trasmettitore di testa integrato nella RTD

Le restanti misure di temperatura sono invece affidate a termocoppie di tipo K, meno precise ma più facilmente maneggiabili, le ragioni saranno spiegate nel capitolo dedicato a Labview; nello specifico sono:

- Temperatura dei fumi all'ingresso del Carter, dopo la torre di lavaggio, dato necessario per capire se il tessuto/cartuccia che si sta testando funziona nel suo range
- Temperatura dei fumi circolante nel diaframma, congiunta alla misura di pressione assoluta effettuata dal Cerabar e quella di pressione differenziale all'attraversamento del diaframma, permette il calcolo della portata in massa dei fumi
- Temperatura dei fumi all'ingresso del camino dopo il riscaldamento per mezzo dello scambiatore, la misura è posta in un punto per cui misura sia la temperatura dei fumi in arrivo dalla caldaia (ciruito di Bypass) e dallo scambiatore (ciruito del filtro)

#### Temperatura dell'acqua

Le temperature in ingresso ed in uscita dalla caldaia servono per verificare la potenza sottratta dall'acqua ai fumi, per riuscire a calcolare questa grandezza è necessario conoscere, oltre che il  $c_p$  dell'acqua, anche la portata di liquido circolante (vedi Proline Promag). Per queste misure si sono utilizzate 2 RTD *Omnigrad TST90* di Endress and Hauser (Foto 3. 8), esplicitamente indicate dal produttore per la misura della temperatura differenziale. Per questo motivo vengono fornite in coppia e solamente riguardo alla coppia sono valide le tolleranze, che sono dell'ordine di 0,1 K tra  $-40^{\circ}\text{C}$  e  $0^{\circ}\text{C}$ , e di 0,05 K tra  $0^{\circ}\text{C}$  e  $200^{\circ}\text{C}$ . Le pressioni massime di esercizio sono 50 bar a  $20^{\circ}\text{C}$  ed 1 bar a  $400^{\circ}\text{C}$ . I tempi di risposta sono di 7,5s ( $T_{50}$ ) e 20,5s ( $T_{90}$ ).

Alla resistenza di questi termometri sono collegati quattro fili anziché due, in modo da compensare l'errore della linea di misura. La testa del sensore alloggia quindi una semplice morsettiera a quattro contatti (Figura ), dei quali ne verranno però utilizzati solamente tre, collegati elettricamente alla scheda di acquisizione del calcolatore

mediante un modulo elettronico apposito per termoresistenze (vedi capitolo sul cablaggio).



Foto 3. 8 EH Omnigrad TST90

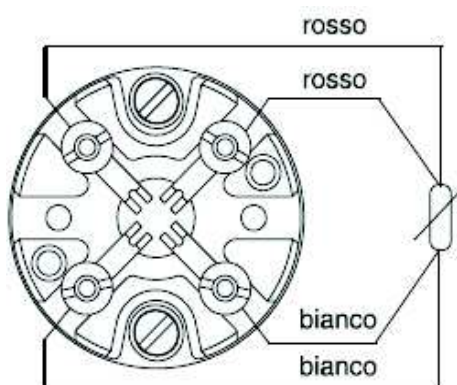


Figura 3.35 Morsettiera dell'RTD Omnigrad TST90

L'ultima misura di temperatura riguarda l'acqua nebulizzata in torre di lavaggio per abbassare la temperatura. Considerando che l'acqua viene prelevata da una vasca a cielo aperto si è scelto di montare una sonda su un sostegno in polistirolo che quindi tenda lo strumento fuori dall'acqua consentendo di misurare la temperatura indipendentemente dal livello di acqua.





Foto 3. 9 Eliwell PT100 per la misura della temperatura dell'acqua

Lo strumento utilizzato per questa misura è una termoresistenza PT 100 prodotte da Eliwell, con capsula in AISI 316 lunga 100 mm, il campo scala è  $-80\div600^{\circ}\text{C}$ , la classe di precisione è B (IEC 715) ed i tempi di risposta dichiarati dal costruttore sono di 3s ( $T_{50}$ ) e 10s ( $T_{90}$ ).

In testa è installato un trasduttore che converte il segnale della termoresistenza in 4-20mA; facendo corrispondere rispettivamente a 4 mA la temperatura di  $0^{\circ}\text{C}$  ed a 20mA la temperatura di  $100^{\circ}\text{C}$ . Il segnale è passivo e deve essere alimentato dal sistema di acquisizione

#### Temperatura dell'aria ambiente

La temperatura ambientale, utile per conoscere la temperatura del combustibile e dell'aria comburente, è misurata sempre utilizzando un trasduttore di tipo RTD PT100. Il modello selezionato per questa applicazione è un *Omnigrad TST434* di Endress and Hauser. Le temperature consentite per l'utilizzo di questo strumento devono essere comprese tra  $-20^{\circ}\text{C}$  e  $+80^{\circ}\text{C}$ ; è dunque ideale per le misure ambientali.

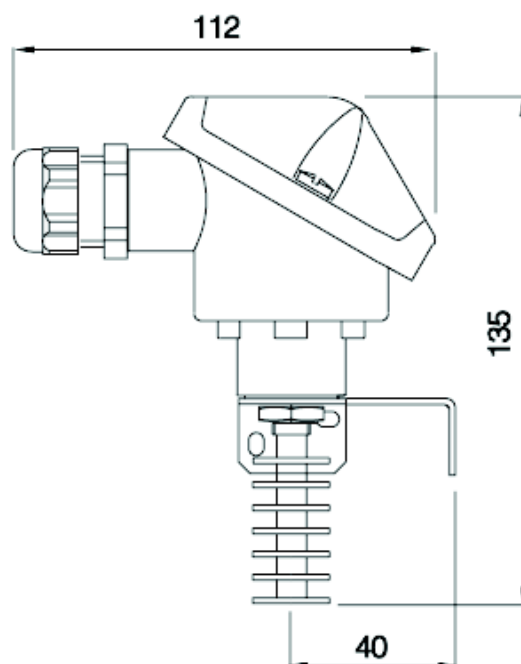


Figura 3.36 EH Omnigrad TST434

Dal disegno è facile notare che lo strumento è dotato, oltre che di una staffa per il fissaggio alla parete della sala caldaia, anche di un elemento alettato in alluminio che ha lo scopo di favorire lo scambio termico tra l'aria e l'elemento sensibile.

Questo strumento è già munito di amplificatore operazionale, il quale offre in uscita un segnale analogico in corrente variabile tra 4 mA e 20 mA. In fase di configurazione, a questi valori limite della corrente sono stati fatti corrispondere rispettivamente 0°C e 50°C. L'alimentazione è fornita in 20 V tramite alimentazione dal sistema di misura.

#### Temperatura in camera di combustione

Questa misura è particolarmente importante per lo studio della riduzione di particolato durante la fase di combustione: si è notato infatti che con l'aumentare della temperatura in camera di combustione si riducono le emissioni di PM2.5 dalla combustione delle biomasse. A partire dalla temperatura di fiamma si possono trarre preziose informazioni riguardo alla tipologia di inquinanti, allo stress termico al quale sono sottoposti i materiali ed ai residui di combustione.

Trattandosi della rilevazione di temperature poco inferiori a 1000°C, la scelta è ricaduta su di una termocoppia, unico strumento (oltre al pirometro) capace di misurare temperature superiori a 850°C.

Le termocoppie sono sensori di temperatura costituiti di due filamenti di materiali diversi isolati per tutta la loro lunghezza e collegati mediante saldatura ad un'estremità detta *giunto di misura* o *giunto caldo*. La zona di collegamento della termocoppia al circuito di misura è detta *giunto di riferimento* o *giunto freddo*. Se esiste una differenza di temperatura tra i due giunti, il sensore genera una forza elettromotrice dipendente da detta differenza di temperatura e dal tipo di materiali costituenti la termocoppia. Tale fenomeno è denominato *effetto Seebeck*, dal quale fu osservato nel 1821, ed è somma di due fenomeni scoperti rispettivamente da Peltier e da Thomson. L'effetto Peltier consiste nella generazione di calore nella giunzione fra due metalli diversi quando vi circola corrente: invertendo la corrente si ha assorbimento di calore, così come fornendo o sottraendo calore circola corrente e quindi si genera una forza elettromotrice ai capi della giunzione. Thomson osservò inoltre che, per l'effetto Peltier, la dipendenza tra forza elettromotrice e la differenza fra le temperature delle due giunzioni avrebbe dovuto essere lineare, mentre sperimentalmente ciò non risultava: scoprì dunque che facendo circolare corrente in un conduttore omogeneo sul quale esiste un gradiente di temperatura, si ha generazione di calore.

Le termocoppie industrialmente più utilizzate sono normalizzate dalla UNI 7938 le cui tabelle danno le forze elettromotrici rispetto ad una temperatura del giunto di riferimento pari a 0°C. Le termocoppie presenti nella detta norma sono classificate in base ai materiali che le costituiscono e sono indicate con delle lettere, come nella successiva Tabella 1.

<i>Tipo di termocoppia</i>	<i>Materiali</i>
S	Platino + Rodio (10%) / Platino
R	Platino + Rodio (13%) / Platino
B	Platino + Rodio (30%) / Platino + Rodio (6%)
J	Ferro / Rame + Nichel
T	Rame / Rame + Nichel
K	Nichel + Cromo (10%) / Nichel + Alluminio (6%)
E	Nichel + Cromo (10%) / Rame + Nichel

**Tabella 3. 7**

La termocoppia acquistata è la *Omnigrad TAF 12D* prodotta da Endress Hauser (Foto 3. 10). Si tratta di una termocoppia in Platino-Rodio/Platino, in grado di misurare temperature fino a 1800°C grazie alla doppia guaina in ceramica.



**Foto 3. 10 . E+H Omnigrad TAF 12 D. Termocoppia per la misura della temperatura di fiamma**

Spesso in aggiunta a queste termocoppie si possono acquistare dei trasmettitori di temperatura, che acquisiscono il segnale in uscita dalle termocoppie (tensione dell'ordine dei mV) e lo convertono in un segnale analogico in corrente a 4÷20 mA, ma, nel nostro caso, si era già provveduto all'acquisto di un dispositivo (EH RIA 46 Foto 3. 11) apposito per l'acquisizione dei segnali da termocoppie.

La termocoppia sarà collegata per mezzo di un cavo autocompensato e poi sarà possibile acquisire il segnale direttamente dall'indicatore, dotato di un'uscita in corrente



Foto 3. 11 EH RIA 46. Indicatore per la termocoppia TAF12D

### 3.4 Procedura sull'impianto sperimentale

Di seguito uno schema semplificato dell'impianto di prova.

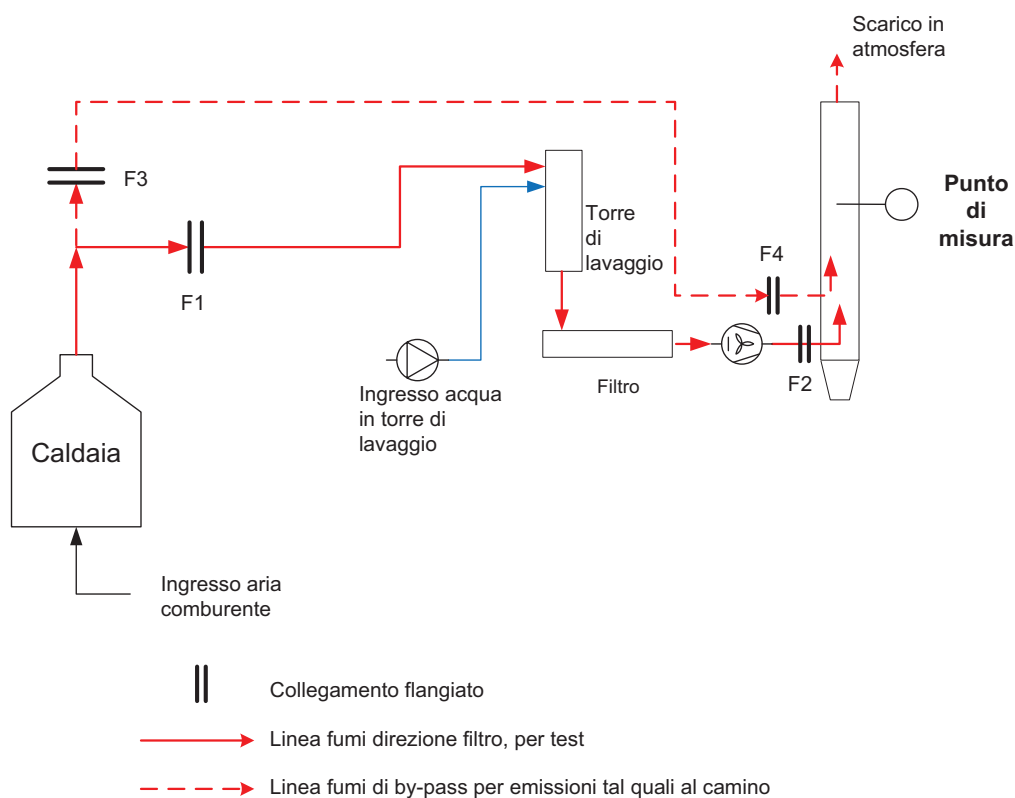


Figura 3 37 Schema impianto di prova

Come già riportato nei capitoli precedenti, in questa versione del circuito sperimentale si sono predisposti due circuiti differenti:

- il primo, bypass dal circuito di prova, permette di inviare i fumi di emissioni dalla caldaia direttamente al camino di campionamento e poi, successivamente, all'esterno. Questo circuito è necessario per il transitorio di avvio, così da non sporcare il circuito di prova e serve inoltre per il campionamento delle emissioni tal quali dalla caldaia. È indicato dalla linea rossa continua in Figura 3 37, nel seguito lo si indicherà con la definizione “circuito bypass”.
- Il secondo circuito è invece il circuito di prova vero e proprio, pensato per testare diverse combinazioni e soluzioni. È indicato dalla linea rossa tratteggiata in Figura 3 37, nel seguito lo si indicherà con la definizione “circuito filtro”.

Come già descritto per deviare il flusso si inseriranno degli ostacoli, nello specifico dei piattelli, fra le flange per deviare il flusso dei fumi; nello specifico:

- Per deviare i fumi lungo il circuito di bypass bisogna inserire un piattello piattello fra le flange F1 e F2 in figura e lasciare libere le flange F3 e F4, così da evitare ingressi nel circuito di prova che porterebbero a sporcarlo

Per deviare i fumi lungo il circuito del filtro bisogna inserire un piattello fra le flange F3 così da impedire che i fumi vadano in direzione del camino o rientrino in circolo dopo essere stati filtrati; ed allo stesso tempo lasciare in semplice collegamento le flange F1 e F2.

## *4 Procedura di campionamento e misura delle PM*

### **4.1 Introduzione ai campionamenti**

Nel seguito si tratteranno in maniera pratica i trattamenti necessari per determinare la concentrazione di polveri sottili presenti sia in aria ambiente che in emissioni da sorgenti fisse (es camino di caldaie).

I metodi utilizzabili sono principalmente due:

- a) Metodo ottico, si utilizza un laser per contare la quantità di particelle contenute in sospensione nei fumi.
- b) Metodo gravimetrico, si campiona un volume noto di fumi facendo in modo di impattarlo in alcuni filtri nella maniera descritta di seguito. Determinato il peso del particolato impattato e rapportato al volume campionato si ottiene la concentrazione negli effluenti gassosi.

Dei due metodi è stato scelto il secondo per le seguenti ragioni:

- Nel caso del metodo ottico bisogna evitare di avere in sospensione nei fumi particelle di acqua. In questo caso verrebbero contate anche particelle che non appartengono alla categoria particolato sottile;
- Il metodo ottico è decisamente più costoso di quello gravimetrico (nel rapporto di 10 a 1).

Per cui, indicato il metodo gravimetrico, è bene definire le normative cui fare riferimento; in ambito europeo (nello specifico in Italia) equivale a indicare le seguenti:

1. **UNI 10169**. Determinazione della velocità e della portata di flussi gassosi convogliati per mezzo del tubo di Pitot.
2. **UNI EN 13284-1**. Emissioni da sorgente fissa - Determinazione della concentrazione in massa di polveri in basse concentrazioni - Metodo manuale gravimetrico.

3. **UNI EN ISO 23210.** Emissioni da sorgente fissa - Determinazione della concentrazione in massa di PM<sub>10</sub>/PM<sub>2,5</sub> negli effluenti gassosi - Misurazione a basse concentrazioni mediante l'uso di impattori multistadio.
4. **UNI EN 14907:2005** Qualità dell'aria ambiente - Metodo normalizzato di misurazione gravimetrico per la determinazione della frazione massica PM<sub>2,5</sub> del particolato in sospensione.
5. **UNI EN 12341: 2001** Qualità dell'aria - Determinazione del particolato in sospensione PM<sub>10</sub> - Metodo di riferimento e procedimento per prove in campo atte a dimostrare l'equivalenza dei metodi di misurazione rispetto al metodo di riferimento
6. **DL 152:2006** Norme in materia ambientale

Le norme appena elencate consentono la determinazione della concentrazione in massa del particolato in emissione da sorgente fisse e sono da utilizzare nell'ordine in cui sono presentate, ognuna è quindi propedeutica alla corretta applicazione della seguente.

In alternativa all'impattore si sarebbe potuto ricorrere ad un sistema con ciclone che però è consigliato per concentrazioni superiori (*indicare concentrazioni*) rispetto al caso dell'impattore (*indicare concentrazioni*), la normativa di tale strumentazione è l'**EPA 201 A** e si applica in campo USA

È importante notare che ogni norma presenta, sin dall'introduzione, le particolari condizioni in cui è possibile applicarla; allontanandosi da questi parametri, la norma stessa perde di importanza ed è quindi necessario fare riferimento eventualmente ad altre normative tradizionalmente utilizzate come da esempio le ISTISAN<sup>1</sup>, NIOSH<sup>2</sup>, OSHA<sup>3</sup> e ISPRA; od in alternativa alla bibliografia di settore.

Tornando alle norme appena presentate, per avere la concentrazione delle PM in sospensione è necessario "sporcare" un filtro di campionamento con un volume noto di gas V. Noto il peso iniziale del filtro pulito, il volume di gas che lo ha "sporcato" e pesando il filtro sporco è possibile ottenere la concentrazione di particolato in sospensione espressa in  $mg/Nm^3$  (per concentrazioni minori  $\mu g/Nm^3$ ):

<sup>1</sup>Istituto Superiore di Sanità. <sup>2</sup>National Institute for Occupational Safety and Health

<sup>3</sup>**Occupational Safety and Health Administration**



$$C = \frac{\text{Peso filtro}_{\text{finale}} - \text{Peso filtro}_{\text{iniziale}}}{V}$$

Rimandando le operazioni da eseguire in laboratorio al capitolo specifico, ci si concentrerà ora sulle procedure da seguire per quanto riguarda la fase di campionamento dei fumi.

Come già detto è necessario fare sempre riferimento alle norme quando possibile, si riporta comunque la successione delle fasi tipo necessarie per eseguire un corretto campionamento ed una successiva seguente misura.

## 4.2 Strumentazione Tecora

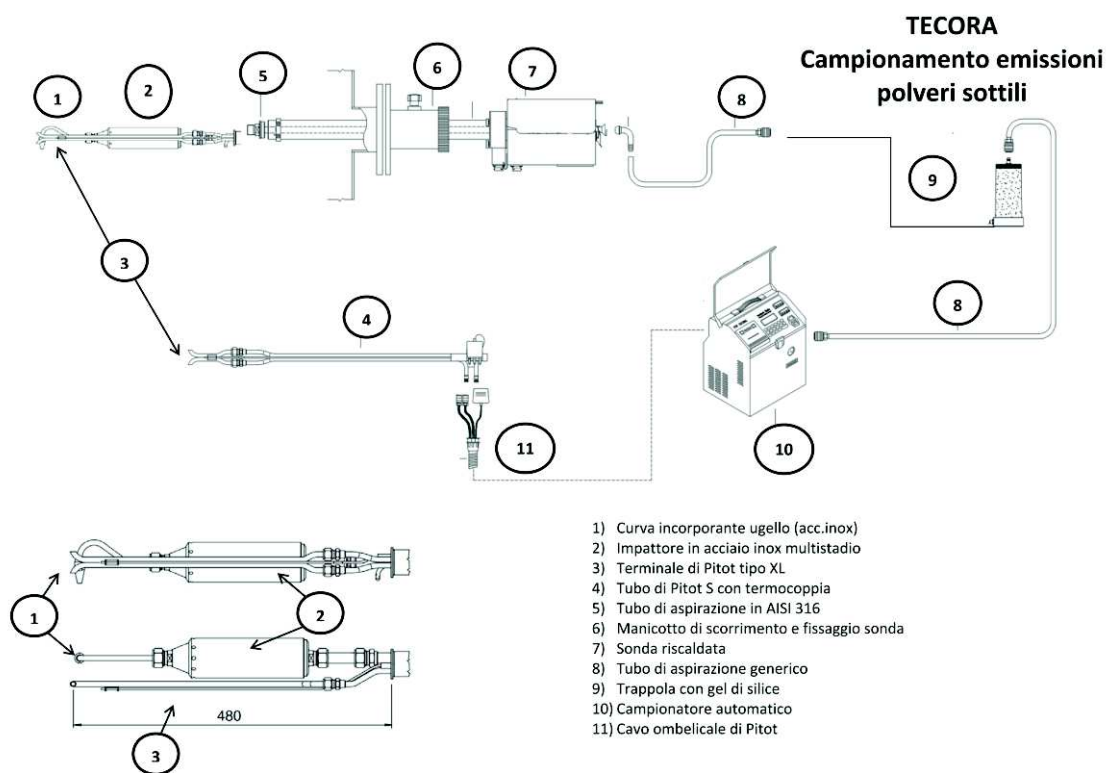
Il sistema di campionamento delle polveri sottili è fornito interamente dall'azienda Tecora e si può sintetizzare nella Tabella 4. seguente; il sistema è in grado di campionare le emissioni da sorgenti fisse (es camini) o ambientali (sospese in aria ad altezza uomo).

Codice Tecora	Nome	Riferimento in Figura 4. 35
Campionatore + Misuratore di portata		
AC99-025-0001SP	ISOSTACK G4 ONE 8 M3/H 220 V	10
AC99-025-9902SP	ISOSTACK G4 TERMOREGOLAT. BOX SONDA	All'interno di 10
AC99-025-9920SP	CAVO OMBELICALE PITOT G4 DA 5 M	11
AD99-012-0010SP	TRAPPOLA PER GEL-SILICE NUOVA 1L	9
SONDA RISCALDATA DA 1 metro		
AC99-090-0001SP	SONDA RISC.INTERCAMB.220V 1 M	7
AC99-090-0041SP	TUBO PITOT S LUNGO CON TK, 1 M	4
AC99-090-9800SP	MANIC.SCORR.SON.RISC.FINO/1,5M	6
TUBI ASPIRAZIONE INTERNI		
AC99-090-9901SP	TUBO ASPIR.316X SONDA RISC.1 M	5
IMPATTORE MSSI		
AC99-107-0010KP	IMPATT.CASCATA INOX MULTST.MSSI	2

AC99-106-0001KP	KIT PREL. INOX P.F.D47 CURVA E UGEL	1
AC99-099-0064SP	PITOT S XL PER CICL.PM10 + 2.5	3
CAMPIONAMENTO AMBIENTALE per PM10 e PM2.5		
AA99-010-0020SP	TESTA PREL. LVS PM10 2.3 M3/H	ND
AA99-010-0003SP	STATIVO PORTATILE PER TESTE PM	ND
AA99-010-0035KP	8 UGELLI INT.LVS PM2.5 2.3M3/H	ND

**Tabella 4. 8 Componenti Tecora sistema di campionamento PM**

Tutti i componenti presentati sono disposti secondo lo schema seguente di Figura 4. 35; il solo componente non visibile è il box sonda termoregolabile (AC99-025-9902SP) che è allocato all'interno del campionatore automatico.



**Figura 4. 35 Campionamento PM Tecora**

#### 4.2.1 ISOSTACK G4 ONE 8 M3/H 220 V

Si tratta una pompa che ha il compito di fornire la giusta portata di campionamento dei fumi, è progettata per eseguire campionamenti anche molto lunghi (es campionamenti ambientali) al termine dei quali si ferma automaticamente. Una volta inserita la portata di campionamento (portata di gas che deve essere raccolta) è capace di correggere il valore nel caso incontrasse perdite di carico (es il filtro di campionamento che si sporca sempre più). Alla fine del campionamento è in grado di salvare un resoconto dei dati (es Volume di aria campionata alle condizioni del camino) e tenerli in memoria fino a quando non si decida di scaricarli mediante una pendrive. Per ulteriori informazioni circa caratteristiche tecniche ed il suo funzionamento si rimanda agli allegati (scheda informativa di Tecora e manuale di istruzioni).

**N.B. La pompa è molto sensibile all'umidità per cui obbligatorio essiccare i fumi aspirati tramite uno o più sistemi in serie: gorgogliatori e trappole con gel di silice.**



Foto 4. 12 Isostack G4 ONE  
da 8 mc/h

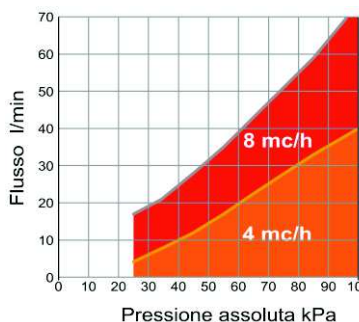


Figura 4. 36 Curva di  
compensazione pompe 4 e 8  
mc/h



Foto 4. 13 Etichetta centralina Isostack  
acquistata

#### 4.2.2 Tubo PITOT S XL PER CICL.PM10 + 2.5

Il tubo di Pitot, tipo S, è uno strumento per la misura della velocità degli effluenti all'interno di un condotto; nota la velocità e il diametro del condotto, se circolare, è possibile calcolarne anche la portata. Questa versione del tubo di Pitot è pensata per essere montata nel camino alla medesima profondità del multimpattore (MSSI) ed per collegarsi con il "Tubo di Pitot S lungo conTK" che, corredato da una termocoppia di tipo K, può misurare la temperatura stessa dei gas.

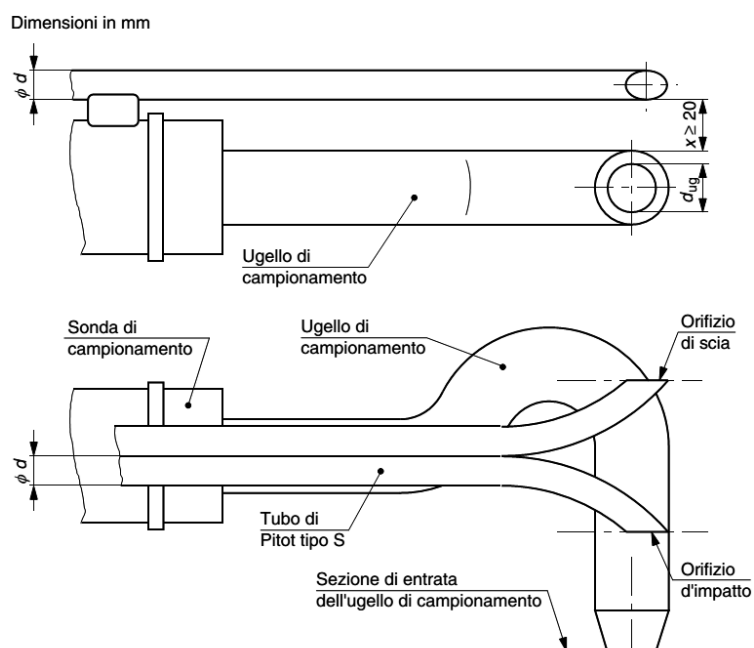


Figura 4. 37 Accoppiamento ugello di campionamento-tubo di Pitot L. Norma UNI 10169

#### 4.2.3 Trappola per gel di silice

Come accennato sopra, è fondamentale provvedere a raccogliere l'umidità prima di inviare i fumi alla centralina Isostack a valle. Una delle soluzioni consiste nel forzare i fumi campionati a passare attraverso del gel di silice che, avendo proprietà disidratanti ed estremamente adsorbenti, raccoglie l'umidità dei fumi.

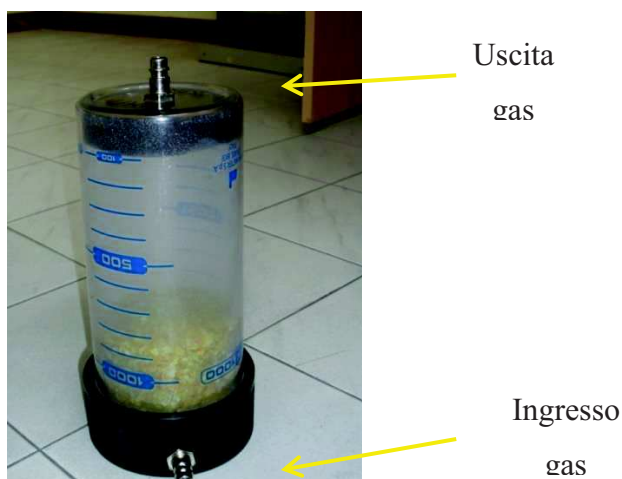


Foto 4. 14 Trappola gel di silice

Considerando che l'umidità tende a raccogliersi sul fondo si dovrà aver cura di collegare l'ingresso dei fumi sul fondo e l'uscita sulla sommità. Naturalmente il gel di silice tenderà a degradarsi assorbendo umidità fino a saturarsi, a quel punto sarà necessario sostituirlo con gel di silice nuovo; per riuscire a capire se il gel di silice sia esaurito è presente un indicatore cromatico: man mano che il gel di silice assorbe umidità, cambia colore. Una volta "esaurita" per poterla riutilizzare basterà metterla in stufa (od anche in un forno da casa) così da far evaporare l'acqua contenuta, appena pronta (colore cambiato) bisogna rimetterla in un contenitore chiuso per impedirle di riassorbire l'umidità dell'aria.

In aggiunta alla trappola è possibile usare un gorgogliatore. Questo viene immerso in acqua e ghiaccio, così facendo l'umidità contenuta nei fumi condensa. Sarebbe meglio adottare questa soluzione prima della trappola con gel di silice, così da aumentare la vita del gel stesso.

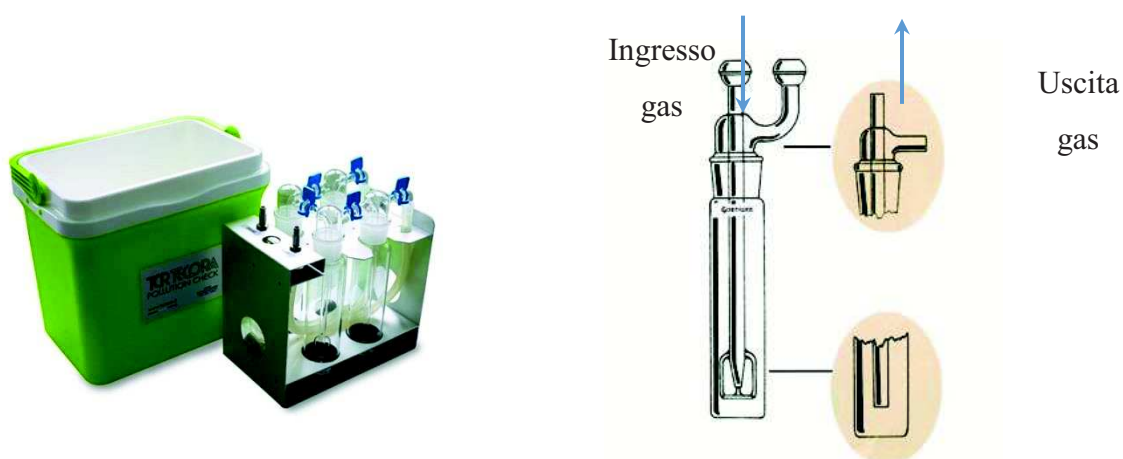


Figura 4. 38 Gorgogliatore

#### 4.2.4 Filtri di campionamento

I requisiti principali che devono soddisfare sono:

- efficienza del filtro piano maggiore del 99.5 % su di un aerosol di prova con un diametro medio delle particelle di 0.3  $\mu\text{m}$  (efficienza che va certificata dal produttore).

- materiale che deve essere chimicamente inerte rispetto ai composti gassosi contenuti nei gas da campionare.

I filtri possono essere in acetato di cellulosa, policarbonato (filtri *a membrana*), oppure in PTFE, fibra di quarzo o fibra di vetro (filtri *a spessore*). I filtri in cellulosa sono adatti solamente per campionamenti a temperatura ambiente, i filtri in PTFE sono utilizzati soprattutto laddove si voglia effettuare analisi chimiche sul particolato raccolto ma, data la superficie liscia, presentano difficoltà a trattenere tutto il particolato e vanno utilizzati solo a temperature inferiori a 230°C. I filtri in fibra di vetro tendono a reagire con l'anidride solforica (SO<sub>3</sub>). I filtri utilizzati per la nostra attività sperimentale (Figura 4.6.7) sono dei dischi di fibra di quarzo del diametro di 47 mm, essi sono chimicamente inerti, resistono bene alle alte temperature e, data la struttura fibrosa, trattengono tutte le particelle solide che impattano su di essi.



Foto 4. 15 Filtro in fibra di quarzo prima del campionamento



Foto 4. 16 Filtro dopo il campionamento

Sono molto delicati e vanno maneggiati esclusivamente attraverso pinzette da laboratorio. Questi filtri hanno un limite di cattura delle polveri, per cui se si supera questo limite il valore misurato in laboratorio perderà di significato. Alla fine dei campionamenti bisognerà verificare che il lato opposto rispetto a quello di impatto delle polveri sia ancora bianco e privo di aloni dati dalla condensa)

#### 4.2.5 Impattore per polveri totali

Per misurare le polveri totali ciò che si utilizza è semplicemente un porta-filtro contenente un filtro piano. Non è richiesta alcuna particolare portata di campionamento per garantirne il buon funzionamento, di conseguenza si può scegliere quella maggiormente consona alle concentrazioni di PM nei fumi: se è elevata si opterà per un valore basso della portata di campionamento (es 10 l/min alle condizioni del camino) e viceversa.

Si tratta di uno strumento di semplice utilizzo ma dall'uso molto limitato in quanto non è possibile determinare la dimensione della polvere impattata. Per riuscire ad eseguire un frazionamento della polvere campionata bisogna ricorrere al multimpattore descritto di seguito.



Figura 4. 39 Portafiltro per la misurazione delle polveri totali

#### 4.2.6 Impattore multistadio Tecora MSSI

Per effettuare la separazione della frazione  $PM_{10}$  e delle  $PM_{2.5}$  dalle polveri totali, ci si affida a dispositivi che effettuano la separazione desiderata basandosi su meccanismi inerziali, il cui principio è illustrato in Figura 4. 40.

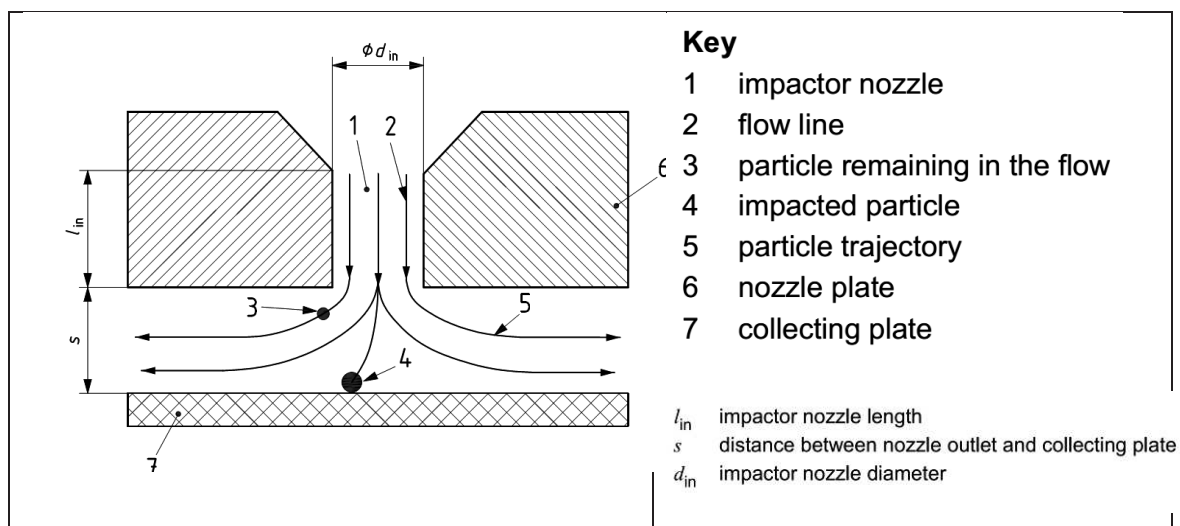


Figura 4. 40 Principio dell'impattore (UNI 23210)



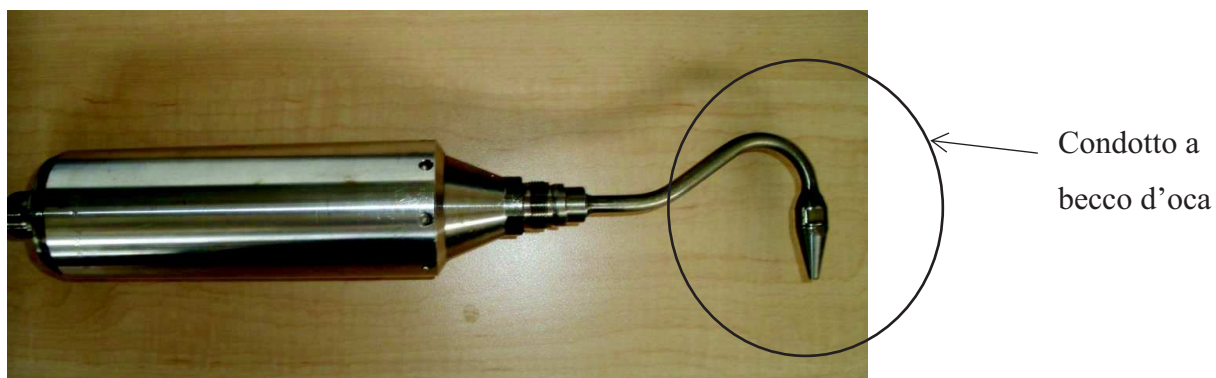
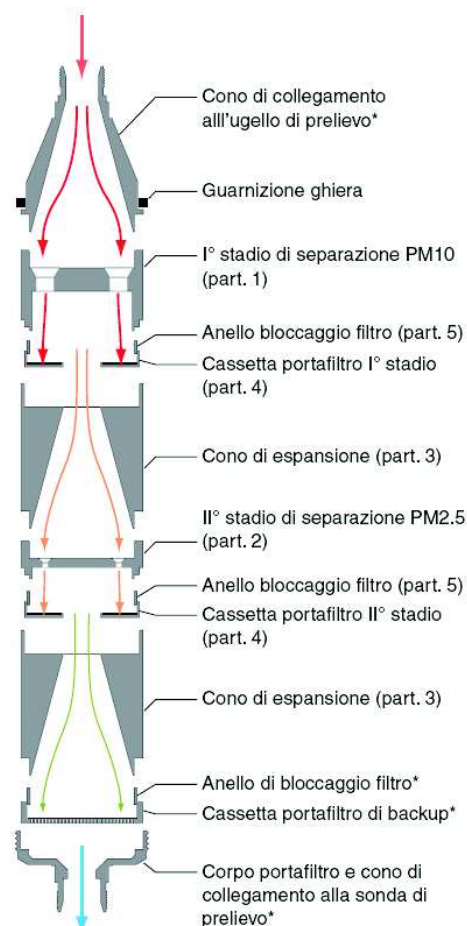


Foto 4. 17 Impattore multistadio Tecora MSSI assemblato con ugello

L'MSSI è dimensionato per portate fino a  $3 \text{ m}^3/\text{h}$ , ed è costituito da un involucro in acciaio inox, contenente 3 stadi di separazione ( $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  e totale sotto i  $2.5 \text{ }\mu\text{m}$ ), ciascuno costituito da un cono di espansione, degli ugelli in parallelo e una cassetta portafiltro. Come si vede dalla Figura 4. 41 la separazione inerziale è realizzata dagli ugelli i quali accelerano il flusso gassoso che poi subisce una brusca deviazione a causa della presenza della cassetta porta filtro, in questo modo le particelle solide di diametro equivalente maggiore di  $10 \text{ }\mu\text{m}$  (al primo stadio) e  $2.5 \text{ }\mu\text{m}$  (al secondo), invece di seguire il flusso gassoso, andranno ad impattare contro la matrice filtrante. Il terzo ed ultimo stadio non presenta tale configurazione: esso è semplicemente costituito da un cono di espansione e un filtro piano che cattura tutto il particolato rimanente.

In questo modo avremo che:

- la massa delle polveri totali intercettate sarà data dalla somma della massa intercettata dai filtri del 1°, 2° e 3° stadio
- la frazione  $\text{PM}_{10}$  sarà data dalla somma della massa di particolato intercettata dai filtri del 2° e 3° stadio.
- la frazione  $\text{PM}_{2.5}$  sarà quella intercettata dal filtro del 3° stadio.





In Foto 4. 18 è raffigurato l'impattore disassemblato, con relativi componenti elencati in Tabella 4. 9 Componenti impattore MSSI.

Figura 4. 41 Spaccato dell'impattore multistadio MSSI



Foto 4. 18 Visione dell'impattore MSSI disassemblato, componenti elencati in Tabella 4. Segue

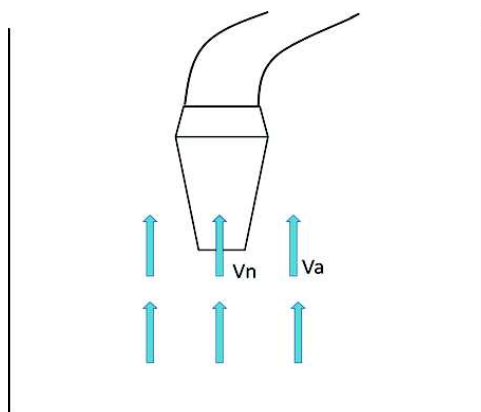
N°	Componente
1	Ingresso fumi-collegamento all'ugello
2	Ugelli per accelerazione del flusso (1° stadio di separazione)
3	Cassetta portafiltro-cono d'espansione
4	Ugelli per accelerazione del flusso (2° stadio di separazione)
5	Cassetta portafiltro-cono d'espansione
6	Corpo portafiltro e cono di collegamento alla sonda di prelievo

Tabella 4. 9 Componenti impattore MSSI

Come si vede i filtri da inserire nei componenti 3 e 5 devono essere previamente fustellati con un apposito accessorio in dotazione con l'impattore. La forma a corona circolare è necessaria per consentire al flusso (che trascina con sé particelle di diametro

inferiore a 10 e 2.5  $\mu\text{m}$  rispettivamente) di raggiungere lo stadio di separazione successivo. Il filtro inserito nel componente 6 invece va lasciato integro in quanto esso deve intercettare tutto il particolato rimanente.

Perché il campione di gas che si va a prelevare sia rappresentativo dell'intera corrente gassosa, il campionamento deve essere isocinetico, ovvero l'ugello con il quale si preleva il campione deve essere di diametro tale che la velocità e la direzione del flusso all'interno dell'ugello siano le stesse che si hanno nel condotto al punto di campionamento, come schematizzato in Figura 4. 42.



**Figura 4. 42 Concetto di campionamento isocinetico**

Per le normative che andremo a seguire, il grado di isocinetismo (ovvero il valore del rapporto  $v_n/v_a$ ) deve essere compreso tra 0.9 e 1.3 per assicurare dei risultati affidabili.

Tramite un apposito foglio di calcolo Excel, Figura 4. 43, è possibile determinare la portata di campionamento in funzione dei seguenti parametri:

- Umidità relativa dei gas da campionare [%]
- Pressione nel condotto [mbar]
- Temperatura nel condotto [°C]
- Percentuale di  $\text{CO}_2$  secca [%]
- Percentuale di  $\text{O}_2$  secca [%]
- Percentuale di aria secca [%], necessario da inserire nel caso si abbia una diluizione dei fumi prima del prelievo, altrimenti si può tenere nulla
- Velocità del gas nel condotto [m/s], misurabile tramite il tubo di Pitot

Alcuni parametri hanno un peso maggiore di altri, che quindi si possono imporre dalla bibliografia; per cui se si brucia granella di mais si può impostare:

- Percentuale di CO<sub>2</sub> secca= 10 [%]
- Percentuale di O<sub>2</sub> secca = 14.2 [%]

Oltre alla portata di campionamento da impostare alla centralina Tecora, il foglio di calcolo restituisce anche il diametro dell'ugello da montare nell'impattore in maniera tale da eseguire un campionamento isocinetico.

TCRTECORA		MSSI - Multistage Stack Sampling impactor	
humidity of the gas $f_0$ :	10,00	[%]	umidità del gas $f_0$ :
operating pressure p :	1013,25	[mbar]	pressione al condotto p :
operating temperature T :	75,00	[°C]	temperatura del condotto T :
humidity of the gas $f_0$ :	89,23	[g/m <sup>3</sup> ]	umidità del gas $f_0$ :
percent volume of CO <sub>2</sub> in dry gas $r_0$ (CO <sub>2</sub> ) :	10,00	[%]	percentuale di CO <sub>2</sub> secca $r_0$ (CO <sub>2</sub> ) :
percent volume of O <sub>2</sub> in dry gas $r_0$ (O <sub>2</sub> ) :	14,20	[%]	percentuale di O <sub>2</sub> secca $r_0$ (O <sub>2</sub> ) :
percent volume of N <sub>2</sub> in dry gas $r_0$ (N <sub>2</sub> ) :	75,80	[%]	percentuale di N <sub>2</sub> secca $r_0$ (N <sub>2</sub> ) :
percent volume of air in dry gas $r_0$ (Aria) :	0,00	[%]	percentuale di Aria secca $r_0$ (Aria) :
gas velocity $v_{gas}$ :	1,50	[m/s]	velocità del gas $v_{gas}$ :
gas flow (operating condition) $V'$ :	2,663	[m <sup>3</sup> /h]	flusso (condizioni al camino) $V'$ :
gasflow (NTP, standard condition) $V'_0$ :	1,881	[m <sup>3</sup> /h]	flusso (normalizzati) $V'_0$ :
gas flow (operating condition) $V'$ :	44,384	[l/min]	flusso (condizioni al camino) $V'$ :
gasflow (NTP, standard condition) $V'_0$ :	31,348	[l/min]	flusso (normalizzati) $V'_0$ :
nozzle diameter $d_s$ :	25,1	[mm]	diametro ugello $d_s$ :
NTP-pressure $p_0$ :	1013	[mbar]	pressione secca $p_0$ :
Volume percent CO <sub>2</sub> in gas $r$ (CO <sub>2</sub> ) :	9,00	[%]	percentuale umida CO <sub>2</sub> $r$ (CO <sub>2</sub> ) :
Volume percent O <sub>2</sub> in gas $r$ (O <sub>2</sub> ) :	12,78	[%]	percentuale umida O <sub>2</sub> $r$ (O <sub>2</sub> ) :
Volume percent N <sub>2</sub> in gas $r$ (N <sub>2</sub> ) :	68,23	[%]	percentuale umida N <sub>2</sub> $r$ (N <sub>2</sub> ) :
Volume percent air in gas $r$ (air) :	0,00	[%]	percentuale umida in aria $r$ (air) :
Volume percent water in gas $r$ (aq-vap) :	9,99	[%]	percentuale umida di acqua $r$ (aq-vap) :
Density of the humid gas in operating condition $\rho$ :	1,015	[kg/m <sup>3</sup> ]	densità gas umido $\rho$ :
Dynamic viscosity of the gas $\eta$ (T) :	1,8648E-05	[kg/ms]	viscosità dinamica $\eta$ (T) :
Mean free path of the gas $\lambda$ :	7,2892E-08	[m]	cammino medio nel gas $\lambda$ :
Gas velocity in the 2,5 $\mu$ m-nozzle $v_{2,5\mu m}$ :	13,86	[m/s]	velocità nell'ugello da 2,5 $\mu$ m $v_{2,5\mu m}$ :
Gas velocity in the 10 $\mu$ m-nozzle $v_{10\mu m}$ :	2,58	[m/s]	velocità nell'ugello da 10 $\mu$ m $v_{10\mu m}$ :
Reynolds number for 2,5 $\mu$ m $Re_{2,5\mu m}$ :	1796	[1]	numero di Reynolds ugello 2,5 $\mu$ m $Re_{2,5\mu m}$ :
Reynolds number for 10 $\mu$ m $Re_{10\mu m}$ :	1096	[1]	numero di Reynolds ugello 10 $\mu$ m $Re_{10\mu m}$ :

Figura 4. 43 Schermata Excel del foglio di calcolo del Multimpattore

Nel caso di debba eseguire il campionamento in condizioni di isocinetismo ed ipotizzando che le condizioni di funzionamento siano costanti è possibile procedere come spiegato di seguito:

- Determinare la portata di aria comburente in caldaia.
- Misurare la velocità dei fumi nel punto di campionamento e la loro temperatura (fare riferimento alla norma **UNI 10169**).
- Inserire nel foglio di calcolo di Tecora i dati misurati, oltre alle percentuali di O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>, umidità del gas, pressione nel condotto.

- Il foglio di calcolo restituisce il diametro dell'ugello da montare e la velocità di campionamento da usare
- Montare l'ugello
- Sulla centralina Isostack selezionare il campionamento a flusso costante e inserire la portata calcolata (alle condizioni di riferimento del foglio Tecora, normali o del camino).

Questa pratica è da applicare per velocità nel condotto superiori a 3 m/s. Nel caso le velocità nel condotto siano inferiori si installerà nell'impattore l'ugello di diametro massimo disponibile (14mm) e si imposterà la portata di campionamento adeguata alle concentrazioni che ci si aspetta: e.g. una portata di campionamento di 10 l/min alle condizioni standard (273°C e 101.3 kPa).

### **4.3 Punto di campionamento**

Come indicato dalla UNI EN 13284, i punti di campionamento vanno accuratamente scelti in modo da avere una velocità del gas sufficientemente elevata e omogenea nel piano di campionamento. Il piano di campionamento deve essere ubicato in una lunghezza di condotto rettilinea (preferibilmente verticale), di sezione costante, deve inoltre trovarsi lontano da qualsiasi perturbazione che potrebbe deviare il flusso (curve, raccordi, valvole parzialmente aperte, etc...).

Il flusso gassoso in corrispondenza del piano di campionamento deve:

- formare con l'asse del condotto un angolo minore di 15°;
- non possedere valori locali negativi;
- avere un rapporto tra velocità locale massima e minima inferiore a 3;

Suddetti requisiti vengono generalmente soddisfatti nelle sezioni di un condotto con 5 diametri idraulici di condotto diritto a monte del piano di campionamento e 2 diametri a valle dello stesso. A questo proposito si è provveduto a dotare il camino di uscita di un punto di campionamento. Trattandosi di un impianto di modeste dimensioni, si è optato

per un solo punto di campionamento per ciascun piano di campionamento, coincidente con l'asse del condotto.

#### **4.4 Campionamenti ambientali**

Fino ad ora ci si è concentrati sulle prove da effettuare per il campionamento delle polveri in emissione da una sorgente fissa, nel nostro caso la caldaia a biomassa; parimenti importante è però il campionamento delle polveri sospese nell'aria ambiente: sapere la loro concentrazione è fondamentale per capire quanto particolato è stato introdotto durante la combustione.

Il sistema di campionamento sfrutta nuovamente il concetto dell'impatto inerziale secondo lo schema di seguito riportato. Il flusso d'aria viene convogliato attraverso gli ugelli di accelerazione e quindi diretto contro un disco d'impatto ricoperto di grasso siliconico. A seconda del taglio dimensionale scelto (PM10, PM2.5, PM1), le particelle con diametro superiore a quello fissato collidono con il disco d'impatto e vengono qui trattenute, quelle di diametro minore proseguono il percorso fino ad essere fermate dal filtro a valle.

Testa impattrice  
alloggiante gli  
ugelli;

Alloggiamento per  
Filtro 47 mm

Uscita aria a  
centralina Isostack

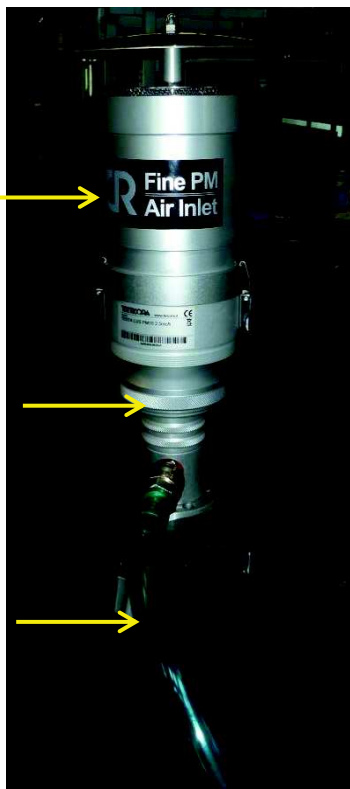


Foto 4. 19 Testa impattrice Tecora  
per PM10 e PM2.5

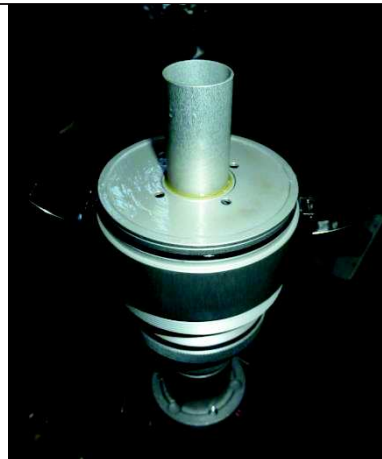
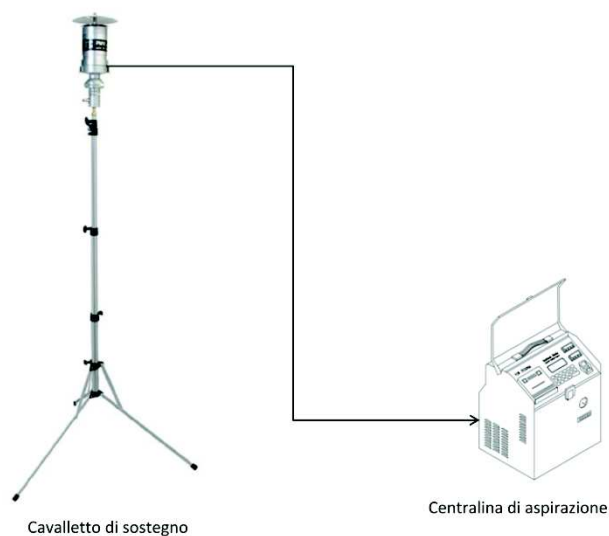


Foto 4. 20 Impattore standard con grasso siliconico



Foto 4. 21 Interno testa impattrice con ugelli

Si tratta di una testa di prelievo standard, per cui l'accumulo progressivo delle particelle sul piano d'impatto modifica le caratteristiche del piano stesso, causando la riduzione dell'efficienza del taglio e richiedendo quindi una pulizia continua.



**Figura 4. 44 Linea di campionamento PM ambientali**

Come si può vedere in Figura 4. 44 l'uscita dalla testa di campionamento è collegato direttamente con la centralina Isostack senza che sia interposta la trappola con gel di silice.

Considerando le basse concentrazioni presenti in aria ambiente la centralina andrà impostata per funzionare alla portata costante di  $2.3 \text{ m}^3/\text{h}$  per una durata di 24h (vedi norma relativa).

**Nota:** i filtri di campionamento devono essere condizionati e pesati prima e dopo l'uso. I filtri per PM ambientali seguono un percorso di condizionamento diverso rispetto ai filtri usati per PM in emissione da sorgenti fisse, questo argomento sarà approfondito nel capitolo sulle attività di laboratorio.

#### 4.5 Tipo di campionamenti condotti

Da quanto appreso in letteratura, vedi Figura 4. 45, la quasi totalità delle PM in emissione dalla combustione della biomassa ha un diametro medio inferiore a 1  $\mu\text{m}$ .

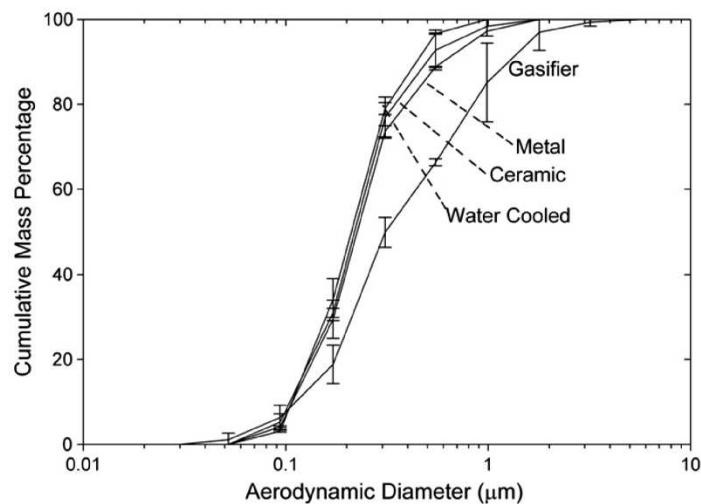


Figura 4. 45 Cumulative mass percentage of particles from biomass combustion cook stoves...(1)

Le prove condotte nelle campagne precedenti hanno confermato i dati della letteratura:

- Il 99.22% delle emissioni dalla caldaia riguardano PM<sub>2.5</sub> (3° stadio dell'impattore MSSI)
- Lo 0.52% è compreso fra i 2.5 e 10  $\mu\text{m}$  (2° stadio dell'impattore MSSI)
- Lo 0.26 % ha dimensione superiore ai 10  $\mu\text{m}$  (1° stadio dell'impattore MSSI)

Considerando infine il carico di lavoro ulteriore che richiede l'impattore multistadio rispetto al campionamento di polveri totali, si è preferito ricorrere alla seconda soluzione: per un campionamento di polveri totali è sufficiente 1 filtro/campionamento mentre per il multimpattore servono 3 filtri per ogni campionamento che sono quindi da preparare in laboratorio, l'operazione nell'insieme richiede 1 giorno.

Le prove da condurre nell'impianto sperimentale consistono in:

- i) Campionamento delle PM<sub>2.5</sub> ambientali; 24 h a campionamento.



- ii) Campionamento delle polveri totali in emissioni dal circuito filtro funzionante con sola aria ambiente, caldaia spenta e pompa alla torre di lavaggio spenta; 24 h a campionamento.
- iii) Campionamento delle polveri totali in emissione direttamente dalla caldaia accesa (circuito di bypass); 15 minuti a campionamento.
- iv) Campionamento delle emissioni totali in emissione dal circuito del filtro con caldaia accesa; 15 minuti a campionamento. Si varieranno differenti parametri e ottenendo varie combinazioni a seconda della configurazione testata

Dalla prova **iv** si otterrà la concentrazione di PM contenute a valle del sistema di filtrazione, note le concentrazioni a monte, prova **iii**, sarà possibile determinare l'efficacia della soluzione testa. È necessario effettuare sempre almeno un campionamento delle emissioni dalla caldaia tutti i giorni in cui si conducono test: questo in quanto le emissioni possono essere influenzate da diversi fattori quali ad esempio la temperatura ambiente

#### **4.6 Quadro normativo di riferimento per i campionamenti**

Le normative sulle quali si è poggiata la campagna sperimentale rappresentano tre livelli distinti: il primo delinea le modalità per determinare velocità e portata del flusso gassoso all'interno di condotti. Queste grandezze sono richieste come dati di ingresso sia per il secondo livello, ovvero la misurazione della concentrazione di polveri totali nel flusso gassoso convogliato usando il metodo manuale gravimetrico, che per il terzo livello, ossia la determinazione della concentrazione di particelle con diametro aerodinamico equivalente minore di 10  $\mu\text{m}$  e 2,5  $\mu\text{m}$  (frazioni denominate  $\text{PM}_{10}$  e  $\text{PM}_{2,5}$ ) nel flusso gassoso convogliato. Nei prossimi 3 paragrafi si accenna alle 3 normative a cui si è fatto riferimento.

### **Normativa UNI 10169**

È la normativa che “descrive il metodo manuale per determinare la velocità e la portata dei flussi gassosi convogliati che si immettono nell’atmosfera”. La misura della velocità viene effettuata tramite tubo di Pitot di tipo L o di tipo S, la data normativa ne prescrive le condizioni di impiego. Tale misurazione richiede:

rilevazione delle dimensioni geometriche della sezione di misurazione (perpendicolare all’asse del condotto).

individuazione, su tale sezione, dei punti necessari per conoscere con sufficiente approssimazione il profilo di velocità.

determinazione di composizione, temperatura e pressione statica del gas.

misurazione della pressione differenziale tra presa di pressione totale e quella statica del tubo di Pitot, in ciascuno dei punti di misurazione.

il calcolo delle velocità puntuali di flusso, ed il conseguente calcolo della velocità media.

Il calcolo della portata in volume ed eventualmente della portata in massa del flusso.

### **Normativa UNI EN 13284**

La UNI EN 13284 si riferisce alla misura della concentrazione di polveri totali in flussi gassosi convogliati in concentrazioni inferiori a  $50 \text{ mg/m}^3$ , emessi da sorgente fissa. Più in generale, essa si può applicare a gas emessi da sorgenti stazionarie e a concentrazioni più alte.

Il metodo al quale si ricorre per determinare la concentrazione di polveri in un flusso gassoso è il *metodo manuale gravimetrico*, che si basa sull’estrazione di una portata nota di un campione del gas in punti rappresentativi, le polveri contenute in tale campione vengono separate tramite un filtro piano pre-pesato, che viene poi essiccato e ripesato. L’aumento di massa del filtro (più il contributo di eventuali depositi a monte dello stesso) è attribuito alle polveri raccolte dal gas campionato. Rapportando tale massa al volume (normalizzato) di gas campionato, si ottiene la concentrazione di polveri nella corrente gassosa, espressa in  $\text{mg/Nm}^3$ .

Le definizioni principali che vengono applicate in tale normativa sono:

- campionamento isocinetico: campionamento ad una portata tale che la velocità  $v_n$  e la direzione del gas entrante nell'ugello di campionamento sono le stesse della velocità  $v_a$  e della direzione del gas nel condotto al punto di campionamento.
- grado di isocinetismo: valore del rapporto tra velocità  $v_n/v_a$  espresso in percentuale come caratteristica dello scarto dal campionamento isocinetico.
- piano di campionamento: piano perpendicolare all'asse del condotto nella posizione di campionamento.
- linee di campionamento: linee nel piano di campionamento lungo le quali sono posizionati i punti di campionamento.
- punto di campionamento: posizione specifica sulla linea di campionamento in corrispondenza del quale viene estratto un campione.
- condizioni normali: valori di riferimento per un gas secco a pressione di 101,3 kPa e a temperatura di 273 K.
- bianco complessivo: campione di prova prelevato sul sito in modo identico ai campioni reali della serie, ad eccezione del fatto che non è campionato alcun gas durante la prova.

Le principali condizioni poste dalla normativa affinché le misure effettuate si possano ritenere valide sono:

Il flusso gassoso nei punti di campionamento ha un profilo di velocità sufficientemente omogeneo e costante.

Il campionamento è effettuato senza perturbare il flusso gassoso, con un ugello dai contorni netti che incontra il flusso nelle condizioni isocinetiche.

I depositi a monte del filtro sono presi in considerazione.

Il sistema di campionamento è progettato e gestito in modo tale da evitare condensa o reazioni chimiche.

Le parti da pesare possono essere il filtro (con o senza supporto), oppure possono includere anche tutte le parti a monte del filtro, a seconda del dispositivo di campionamento utilizzato. In ambo i casi tutte le parti da pesare vanno previamente

essiccate in forno e poi raffreddate fino a temperatura ambiente in un essiccatore. Dopo il campionamento si segue la medesima procedura prima di effettuare la pesatura.

### **Normativa UNI EN ISO 23210**

Rappresenta il terzo livello normativo: la ISO 23210 “delinea un metodo di riferimento per la determinazione delle concentrazioni in massa di  $PM_{10}$  e  $PM_{2,5}$  nelle emissioni da sorgente fissa mediante l’uso di impattatori a due piani”.

Come vedremo in seguito, le frazioni  $PM_{10}$  e  $PM_{2,5}$  sospese in una corrente gassosa, vengono separate usando metodi di tipo inerziale. Gli strumenti che si utilizzano a tale scopo sono riconducibili a 2 tipologie:

cycloni

impattatori (o impattori) inerziali

I primi vengono utilizzati in presenza di correnti gassose con alte concentrazioni di particolato, mentre i secondi si usano laddove le concentrazioni sono minori (per la normativa il valore discriminante è  $50 \text{ mg/Nm}^3$ ). E’ proprio all’utilizzo di questa seconda tipologia di separatori inerziali che la norma ISO 23210 si riferisce.

Elenco delle norme da seguire per eseguire i campionamenti ambientali e di emissioni di polveri sottili.

### **Normativa testa di campionamento ambiente EN 12341**

Di seguito un estratto della normativa con riferimento al condizionamento del filtro.

*Tutti i filtri (sia quelli in esame sia quelli di riferimento) devono essere maneggiati in modo simile. Devono essere impiegati filtri aventi un'efficienza di separazione  $> 99,5\%$ . Al fine di ridurre al minimo gli artefatti sul filtro, devono essere scelti filtri in fibra di quarzo.*

*Prima di ogni impiego, devono essere rimosse dal filtro vergine eventuali fibre staccate. In seguito, i filtri non ancora utilizzati devono essere posti per 48 h su appositi vassoi forati aperti ma protetti contro la polvere all'interno di una camera di pesatura con aria condizionata ed esposti a una temperatura di  $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$  e un'umidità relativa di  $(50 \pm 5) \%$  prima della pesatura.*

*Inoltre, dopo il prelievo, i filtri devono essere equilibrati nelle stesse condizioni prima di poter essere pesati.*

*Filtri molto secchi (per esempio non utilizzati e conservati nelle vicinanze di un radiatore prima della fase di condizionamento preliminare) impiegano molto più di 48 h per raggiungere l'equilibrio nelle condizioni della camera di pesatura descritte sopra. Al fine di evitare questo tipo di problema, i filtri non ancora utilizzati devono essere collocati prima nella camera di pesatura. Anche i filtri che si sono impregnati di umidità durante il prelievo non raggiungono l'equilibrio dopo 48 h di condizionamento. Questi filtri non devono essere sottoposti ad asciugatura supplementare in un forno o essiccatore, in quanto potrebbero verificarsi perdite di materiale volatile dal campione. In questo caso, la fase di condizionamento di 48 h deve essere prolungata di altre 24 h. Al fine di proteggere i filtri durante il trasporto e lo stoccaggio, devono essere impiegate apposite cassette e capsule di Petri.*

*La risoluzione della bilancia usata deve essere di almeno 10 µg. La bilancia deve essere installata e utilizzata nella camera di pesatura di cui sopra.*

#### **4.7 Procedure in laboratorio e strumentazione**

Le fasi di condizionamento e pesatura sono di fondamentale importanza per la determinazione della concentrazione di polvere in emissione ed in sospensione in aria. Considerando che questi campionamenti sono regolati da normative differenti è importante che essi vengano condotti secondo quanto specificato nelle normative stesse. Nel seguito si descriveranno le procedure da seguire in laboratorio per quanto riguarda il condizionamento dei filtri da adoperare **per emissioni da sorgente fissa**.

Di seguito si riportano gli elementi fondamentali per eseguire il condizionamento e le operazioni di pesatura dei filtri:

- Stufa di essiccazione
- Essiccatore
- Bilancia analitica alla 5° cifra decimale (10 µg)

Nota: Con il termine “Forno” si indica il “forno a muffola” le cui caratteristiche principali sono di arrivare anche fino 1000°C e, grazie alla muffola, permette di avere una distribuzione molto uniforme delle temperature al suo interno; è indicata nel caso in cui si voglia calcinare (rimuovere tutta la parte organica) i componenti al suo interno; per contro si presenta con spazi molto esigui.

Invece, con il termine “stufa” si vuole indicare la “stufa da essiccazione”. È contraddistinta da temperatura nettamente inferiori rispetto al forno, indicativamente nell'ordine di 300°C e da un volume interno superiore, circa 30 l. La convezione al suo interno può essere sia naturale che forzata.



Foto 4. 22 Forno a muffola



Foto 4. 23 Stufa termostatica

L'essiccatore è utilizzato nei laboratori di chimica per mantenere asciutte sostanze che assorbono l'umidità. Consiste in un recipiente di vetro spesso con coperchio, a metà altezza del recipiente si trova un piano forato in ceramica su cui vengono poggiati i contenitori delle sostanze da essiccare. Al di sotto del piano viene posta una sostanza fortemente igroscopica, ad esempio pentossido di fosforo ( $P_2O_5$ ) o (meno pericoloso) del gel di silice addizionato di sali di cobalto che cambiano colore dal blu al rosa in funzione del loro grado di idratazione, dando un'indicazione visiva dell'efficacia disidratante della silice.

Il bordo del coperchio viene in genere ingrassato con del silicone per isolare l'interno. Alla sommità del coperchio spesso è posta una valvola collegabile ad una pompa meccanica per porre sotto vuoto l'interno e ridurre la quantità di umidità presente all'interno dell'essiccatore.



Foto 4. 24 Essiccatore il policarbonato



Foto 4. 25 Essiccatore in vetro

L'ultimo componente fondamentale è la bilancia analitica.



Foto 4. 26 Bilancia Analitica



Arrivando alla 5° cifra decimale, di tratta di una bilancia molto sensibile, per cui è necessario usarla con le dovute precauzioni quali la presenza di un tavolo antivibrazioni, l'assenza di strumentazione nelle vicinanze che ne potrebbe precludere il buon funzionamento, etc (vedi norma EN 12341, locale di pesatura).

Considerando l'assoluta superiorità dei campionamenti di emissioni rispetto a quelli ambientali, nel seguito si riporterà la procedura da seguire per il condizionamento e la pesata dei filtri di campionamento (fibra di quarzo, diametro 47mm).

Anche se non sempre specificato, i filtri si maneggiano solo ed esclusivamente mediante le apposite pinzette.

Prima di essere utilizzati i filtri vanno condizionati ovvero si riscaldano i filtri in stufa portandoli fino a 180°C per almeno un'ora dopodiché li si lascia riposare all'interno di un essiccatore con del gel di silice affinché raggiungano una condizione termogravimetrica stabile. Trascorse 12 ore infine i filtri condizionati si possono pesare nella bilancia analitica e inserire nelle apposite capsule per rendili disponibili per i campionamenti. Una volta usato il filtro si dovranno proseguire le medesime operazioni effettuate per il filtro pulito, avendo cura di scaldare i filtri a 160°C.

Tutti i dati ricavati andranno quindi inseriti in un apposito foglio Excel con le informazioni di seguito riportate.



Foto 4. 27 Capsula di Petri predisposta per accogliere  
filtri



Foto 4. 28 Capsula di Petri con filtri



Esempio foglio Excel

Colonna numero	Destinazione
1	Data di condizionamento filtro pulito
2	Numero filtro condizionato, usare sempre una numerazione crescente così da non avere più filtri con lo stesso numero, anche se condizionati in giorni differenti
4	1° pesata filtro pulito [g]
5	2° pesata filtro pulito [g]
6	3° pesata filtro pulito [g]
7	Media delle 1°, 2° e 3° pesata del filtro pulito (colonna 4, 5 e 6) [g]
8	Numero del campionamento in cui il filtro è stato usato (da inserire appena possibile)
9	Numero stadio (solo se usato Tecora MSSI)
10	1° pesata filtro sporco [g]
11	2° pesata filtro sporco [g]
12	3° pesata filtro sporco [g]
13	Media della 1°, 2° e 3° pesata del filtro sporco [g] (colonne 10, 11 e 12)
14	Quantità di polvere raccolta, misurata per differenza di peso tra la colonna 13 e la colonna 7 [g]
15	Quantità di polvere raccolta [mg]

Il valore calcolato nell'ultima colonna va riportata nel foglio Excel relativo ad ogni singolo campionamento, dove è già presente il volume di gas che ha attraversato il filtro [Nm<sup>3</sup>] al valore di ossigeno misurato; dividendo il peso per il volume si avrà la concentrazione in mg/Nm<sup>3</sup> alle condizioni di ossigeno misurato.

**Infine** tutti i valori di concentrazione del particolato misurati con il metodo gravimetrico, vanno riportati, per avere un confronto veritiero, allo stesso valore di ossigeno (secondo il D.Lgs. 152/2006 le concentrazioni vanno riferite all'11% di ossigeno). In particolare la concentrazione riferita all'11% di ossigeno presente nei fumi è data da:

$$C_{11\% \text{ di } O_2} = \frac{C * (21 - 11)}{(21 - \%O_2)} \quad (3.2)$$

dove C è la concentrazione misurata come rapporto tra peso e volume e %O<sub>2</sub> e la quantità di ossigeno misurata nei fumi dopo ogni campionamento con l'analizzatore di combustione.

### ***Operatore***

Con riferimento ad un "lotto" di filtri da trattare, è consigliabile che sia sempre la stessa persona ad occuparsene, infatti ogni operatore, pur seguendo la procedura descritta, tenderà a seguire un proprio schema mentale, perfettamente comprensibile da parte sua ma non da altri operatori: ad esempio, posizionati i filtri come in Foto 4. 28, può non essere chiaro se i numeri scritti si riferiscano al filtro rispettivamente a sinistra o a destra. Sarebbe altresì utile che il medesimo operatore che ha condizionato e pesato i filtri puliti si occupasse di condizionare e pesare anche i filtri sporchi, così facendo si ha una diminuzione degli errori sistematici introdotti dall'operatore.

## 5. Modellizzazione

Da quanto detto fino ad ora si può ricavare che, per la progettazione di una nuova configurazione della torre di lavaggio, è necessario:

- 1) conoscere il carico e la distribuzione granulometrica del particolato da filtrare, decidendo qual è il valore di rendimento che si vuole ottenere (Capitolo 3);
- 2) applicare le leggi fisiche teoriche al moto della particella per vedere quali sono i meccanismi in azione in funzione della dimensione della particella  $D_p$ : è utile trovare la suddivisione in intervalli dei diametri  $D_p$  come mostrato alla fine del Capitolo 2 e valutare l'efficienza di filtrazione dovuta ai diversi meccanismi;
- 3) ottimizzare i parametri di design quali portata di liquido, velocità relativa tra fumi e gas, grado di vuoto, dimensione dell'elemento filtrante (Capitolo 3), per determinare l'efficienza di cattura desiderata;
- 4) effettuare un'analisi delle perdite di carico e calcolare i costi energetici, che devono risultare contenuti (Capitolo 3).

### 5.1 Caratteristiche delle gocce di acqua

Per tutti i meccanismi, le caratteristiche delle gocce hanno influenza sull'efficienza di cattura e in particolare ciò che impatta sulla filtrazione sono la velocità delle gocce iniettate e la loro dimensione. Entrambe le grandezze hanno una distribuzione probabilistica all'interno dello spray di gocce generato da qualsiasi dispositivo spruzzatore, per cui sia per la velocità che per la dimensione si dà un valore medio.

Sia la velocità che la dimensione media delle gocce dipendono dalla pressione con cui viene spruzzata l'acqua.

[19] La velocità di fuoriuscita delle gocce da un ugello deriva dal teorema di Bernoulli:

$$v_L = \sqrt{\frac{2p}{\rho_L}}$$

con  $p$  pressione dell'acqua nell'ugello e  $\rho_L$  densità dell'acqua.

Come dimensione media delle gocce, viene spesso utilizzato il diametro di Sauter ( $D_{32}$ ), ossia è il diametro di una goccia per la quale il rapporto tra volume e area superficiale sia lo stesso di quello relativo all'intero getto.

[34] Per la determinazione di questo diametro ci sono molti modelli. Facendo riferimento al modello di Harman si ha:

$$D_{32} = 3330 d^{0.3} \mu_L^{0.07} \rho_L^{-0.648} \sigma_L^{0.15} v_L^{-0.55} \mu_G^{0.78} \rho_G^{-0.052}$$

dove  $d$  è il diametro dell'ugello;  $\mu_L$  la viscosità dell'acqua;  $\rho_L$  la densità dell'acqua;  $\sigma_L$  la tensione superficiale dell'acqua e  $v_L$  la velocità dell'acqua;  $\mu_G$  è la viscosità dei fumi e  $\rho_G$  la loro densità.

Anche la dimensione media è influenzata dalla pressione dell'acqua che cambia il valore della velocità  $v_L$  di fuoriuscita dell'acqua, presente nell'espressione di  $D_{32}$ .

In particolare più è grande la pressione con cui viene inviata l'acqua e più le goccioline che si formano sono piccole e veloci.

Allora nel modello precedentemente descritto per la filtrazione con acqua nebulizzata, la dimensione della goccia  $D$  può essere sostituita con il valore del diametro medio  $D_{32}$ .

Si è detto che se la dimensione delle gocce diminuisce vengono favoriti tutti i meccanismi di filtrazione perché rispettivamente avere particelle più piccole significa avere numero di Peclet minore, che favorisce la diffusione, parametro di intercettazione  $R$  maggiore che migliora il rendimento di intercettazione e numero di Stokes maggiore che determina maggiore impatto.

Per quanto riguarda la velocità delle gocce, questa ha una forte influenza sul numero di Stokes: se la velocità relativa tra fumi e gocce è elevata,  $St$  aumenta e così anche l'efficienza per impatto.

Si evidenzia che, mentre nella definizione di Stokes si ha la velocità relativa, in quella del numero di Peclet si mantiene la velocità del flusso di gas senza considerare quella dell'acqua. Questo è dovuto al fatto che il numero di Peclet indica quanto una particella si sposta in direzione diversa da quella di convezione del flusso, per cui è importante solo la velocità del flusso stesso: l'acqua in questo caso ha il compito di intrappolare il particolato che diffonde in direzione diversa dalla linea di flusso.

In particolare, a partire dai risultati ottenuti con le configurazioni già testate, si è deciso di sviluppare l'idea di cattura del particolato, sempre con acqua iniettata da ugelli o altri dispositivi adeguati, e sfruttando un riempimento casuale di corpi sferici. Su questa configurazione infatti sono stati svolti test parziali, senza variare i parametri (portata di acqua, altezza del letto, grado di vuoto) e soprattutto utilizzando materiale già a disposizione (ugelli spruzzatori con i limiti detti nel Capitolo 3 e palline in polipropilene di diametro pari a 3 mm). Nonostante questo però, questa soluzione ha stabilito un valore di efficienza maggiore dei test con il riempimento strutturato Refill, in quanto il grado di vuoto è molto inferiore, con perdite abbastanza contenute, o comunque molto minori rispetto al caso dell'atomizzazione per effetto Venturi.

Questa configurazione allora è stata poi rivalutata da un punto di vista matematico, ripercorrendo le fasi sopra elencate, in modo da determinare i parametri che permettessero di raggiungere l'obiettivo sull'efficienza ( $\eta > 99\%$ ) e valutare conseguentemente i consumi energetici e determinare se questi possono essere considerati o meno accettabili.

## **5.2 Carico e distribuzione granulometrica del particolato proveniente dalla combustione della biomassa**

La prima fase da effettuare per la progettazione di un dispositivo di filtrazione del particolato, è valutare la concentrazione dell'inquinante nei fumi della combustione e la distribuzione della sua dimensione.

Si riafferma il fatto che l'efficienza di cattura di ogni tipologia di sistema filtrante, e quindi anche delle torri di lavaggio, dipende dalle condizioni in cui viene svolta la combustione e dalle caratteristiche del particolato stesso.

Nel caso dell'impianto sperimentale allestito per le prove, le condizioni di buona combustione sono ottenute utilizzando una portata di mais pari a 3 kg/h e un eccesso di aria del 100% corrispondente ad una portata di 36 kg/h (il valore stechiometrico è 6kg di aria per ogni kg di mais), per una portata di fumi totali di circa 40kg/h: impostando questi parametri, la concentrazione di particolato emesso in atmosfera sta intorno ai

250-350 mg/Nm<sup>3</sup>, risultato dei test eseguiti con l'impattore e tutta la strumentazione necessaria.

Per quanto riguarda la distribuzione della dimensione del particolato che caratterizza i fumi della combustione di mais, sempre nelle condizioni ottimali descritte, i dati provenienti dalle prove sperimentali con il multi-impattore attestano che la granulometria è suddivisa come segue:

- per il 99.22% si tratta di PM<sub>2.5</sub> (particolato di diametro inferiore o uguale a 2,5 µm);
- per lo 0.52% il particolato è compreso fra i 2.5 e 10 µm;
- lo 0.26 % ha dimensione superiore ai 10 µm.

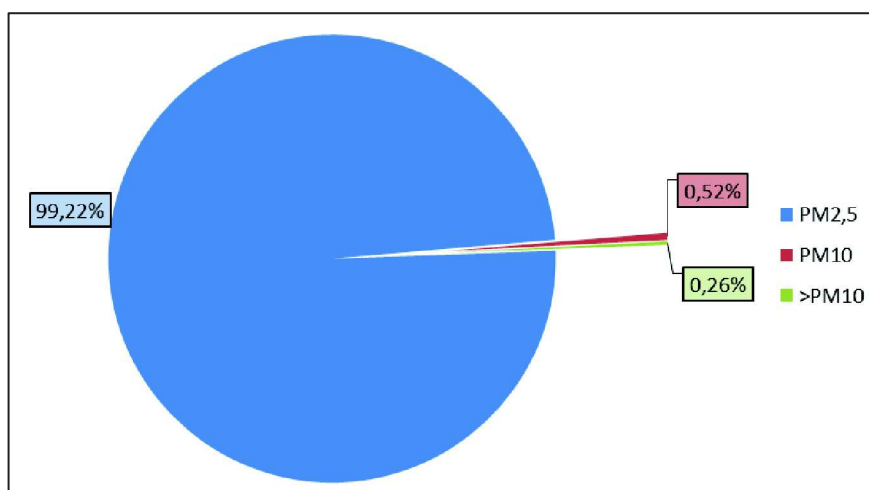


Figura 5.46 – Composizione della dimensione del particolato dalla combustione di mais, ottenuta durante le prove sperimentali utilizzando il muti-impattore

Le informazioni relative alla granulometria, ottenute dalla sperimentazione, confermano i dati della letteratura, che mostrano che le dimensioni del particolato emesso dalla combustione della biomassa sono quasi completamente al di sotto di 2,5 µm, ma soprattutto comprese tra 0,1 e 1 µm di diametro [30] [31] [32]. Allora avendo dimensioni del particolato così ridotte, la filtrazione risulta più difficile.

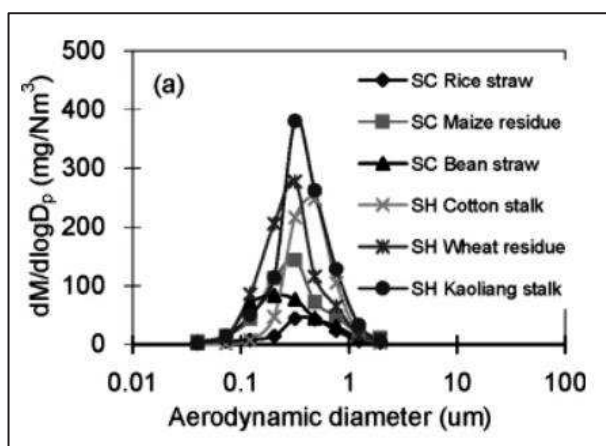


Figura 5.47 Distribuzione in massa della granulometria del particolato fornita per diversi tipi di biomassa.

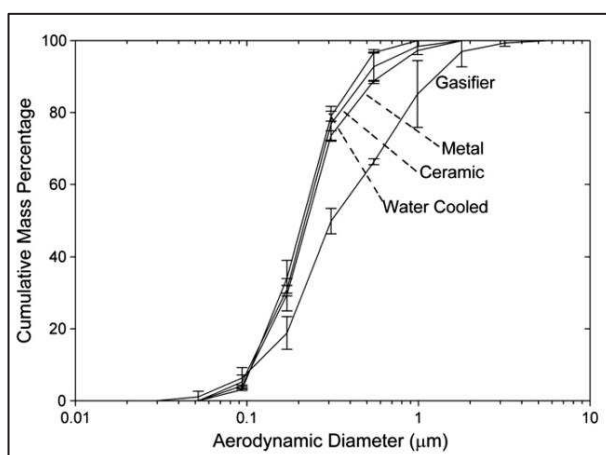


Figura 5.48 – Percentuale cumulativa della massa in funzione della distribuzione granulometrica del particolato nei fumi della combustione della biomassa in diverse tipologie di caldaie. Fonte: [31].

Un altro parametro importante per la caratterizzazione del particolato è la densità. Questa grandezza è difficile da valutare per il particolato, in quanto si tratta di un insieme numeroso di composti diversi tra loro (particelle carboniose, metalli, silice, inquinanti liquidi o solidi), di diversa densità e forma, ma soprattutto dipende molto dalle condizioni con cui si effettua la combustione.

### 5.3 Modello matematico previsionale

In parallelo con le prove sperimentali, il gruppo di ricerca sta portando avanti la realizzazione e validazione di un modello matematico studiato per la valutazione dell'efficienza di cattura del particolato alle condizioni operative che si hanno nell'impianto sperimentale già descritto e alle configurazioni della torre per le quali si sono già effettuate le prove e quindi si hanno già risultati sull'efficienza.

La disponibilità di dati sperimentali è necessaria per convalidare il modello in quanto alcuni parametri sono in funzione della particolare soluzione impiantistica per cui non si possono definire a priori; dopodiché si potrà utilizzare il modello per la valutazione di nuova configurazione della torre, oltre a descrivere anche la rimozione del particolato nella configurazione della torre di lavaggio ad ugelli e in quella dell'atomizzazione con effetto Venturi e battente d'acqua.

#### **Configurazione della torre di lavaggio ad ugelli contrapposti**

Per applicare il modello matematico alla configurazione della torre di lavaggio nella tabella seguente:

Parametri	Valore
Portata di acqua	17 l/min
Pressione	3 bar
Diametro delle gocce (D)	150 $\mu\text{m}$
Velocità relativa tra acqua e fumi ( $U_r$ )	12 m/s
Frazione di acqua nella torre ( $\alpha$ )	0,8
Rapporto tra viscosità ( $\sigma$ )	54

**Tabella 5. 10 Parametri inseriti nel modello matematico per stimare l'efficienza nella configurazione della torre di lavaggio con ugelli contrapposti**

Introducendo nel modello queste condizioni, si ottiene l'andamento del rendimento di filtrazione secondo i diversi meccanismi di cattura, in funzione del diametro aerodinamico del particolato.



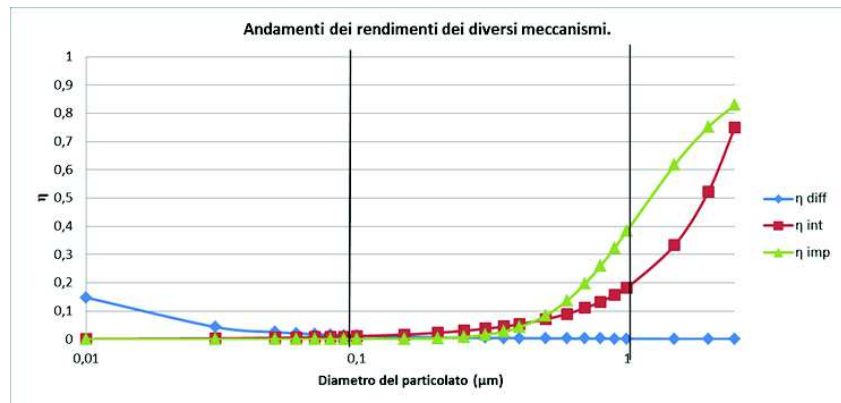
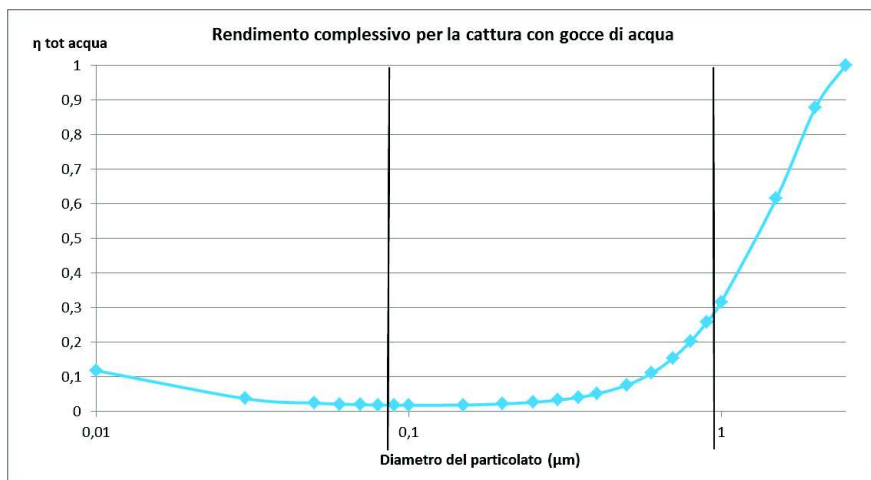


Figura 5.49 Andamento dei rendimenti dei tre meccanismi di filtrazione con gocce di acqua, secondo il modello di Lee, al variare della dimensione delle gocce  $D_p$ , con i parametri della configurazione con ugelli

Sommando i termini relativi ai tre meccanismi, deriva l'andamento dell'efficienza totale che presenta la tipica forma ad U. Infatti sulle piccole dimensioni e su quelle grandi, l'efficienza è molto alta: per piccoli diametri delle particelle intercettazione ed impatto hanno effetto praticamente nullo, mentre la diffusione agisce in maniera dominante e con un'elevata efficienza; allo stesso modo per grandi diametri del particolato agisce solo l'impatto con efficienze molto elevate; nella zona centrale invece i meccanismi agiscono contemporaneamente, ma le dimensioni sono tali da non ottimizzare le condizioni per uno specifico meccanismo, per cui tutti e tre i rendimenti sono maggiori di 0, ma con valori contenuti, e l'efficienza totale è minore.



**Figura 5.50 Andamento del rendimento complessivo di filtrazione con gocce di acqua, secondo il modello di Lee, al variare della dimensione delle gocce  $D_p$ , con i parametri della configurazione con ugelli.**

A partire dall'andamento dell'efficienza di filtrazione in funzione della dimensione del particolato, per valutare il rendimento del dispositivo filtrante è necessario inserire la distribuzione granulometrica.

Facendo riferimento ai dati sperimentali e agli studi sulla granulometria del particolato derivante dalla combustione di diversi tipi di biomassa [30], si può ricavare la distribuzione della dimensione del particolato, in termini di massa.

Moltiplicando la concentrazione in massa per ogni dimensione del particolato, per il corrispondente valore dell'efficienza, ottenuto dall'applicazione del modello, si ottiene la concentrazione in massa del particolato filtrato in totale; dividendo poi questo risultato per la concentrazione iniziale, ossia quella del particolato nei fumi prodotti dalla caldaia, si ottiene il rendimento della specifica configurazione che si sta considerando.

In particolare, eseguendo questi passaggi, per la configurazione della torre di lavaggio con i 6 ugelli si ottiene una stima dell'efficienza globale di filtrazione pari al **17%**, che differisce dal valore sperimentale ottenuto, pari a 28% circa, ma si può notare che la differenza non è così eccessiva.

### **Configurazione, atomizzazione con effetto Venturi**

La stessa procedura per la valutazione matematica dell'efficienza di filtrazione globale si applica anche al caso dell'atomizzazione con effetto Venturi, inserendo i relativi valori nei parametri (vedi Tabella 5.5):

Parametri	Valori
Portata di acqua	4,83 l/min
Pressione	100 bar
Diametro delle gocce (D)	40 $\mu\text{m}$
Velocità relativa tra acqua e fumi ( $U_r$ )	150 m/s
Frazione di acqua nella torre ( $\alpha$ )	0,8
Rapporto tra viscosità ( $\sigma$ )	54

Tabella 5. 11 Parametri inseriti nel modello matematico per stimare l'efficienza nella configurazione della torre con effetto Venturi

L'elevata pressione che la pompa fornisce viene utilizzata per creare gocce più piccole e più veloci rispetto al caso con gli ugelli: è per questi due motivi che l'efficienza ottenuta è più alta.

Anche in questo caso si introducono nel modello i parametri relativi alla torre con effetto Venturi, così da ottenere gli andamenti dei rendimenti dei singoli meccanismi e quello totale, in funzione della dimensione del particolato.

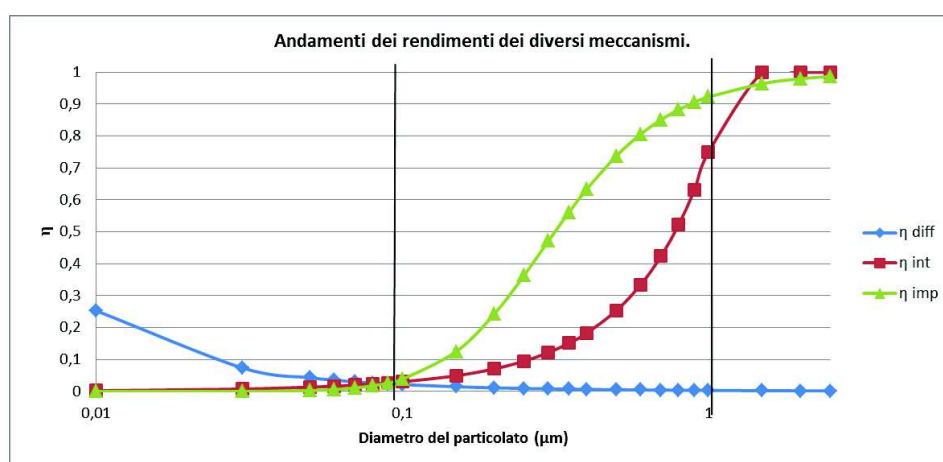


Figura 5.51 Andamento dei rendimenti dei tre meccanismi di filtrazione con gocce di acqua, secondo il modello di Lee, al variare della dimensione delle gocce  $D_p$ , con i parametri della configurazione con effetto Venturi: l'impatto è il meccanismo dominante.

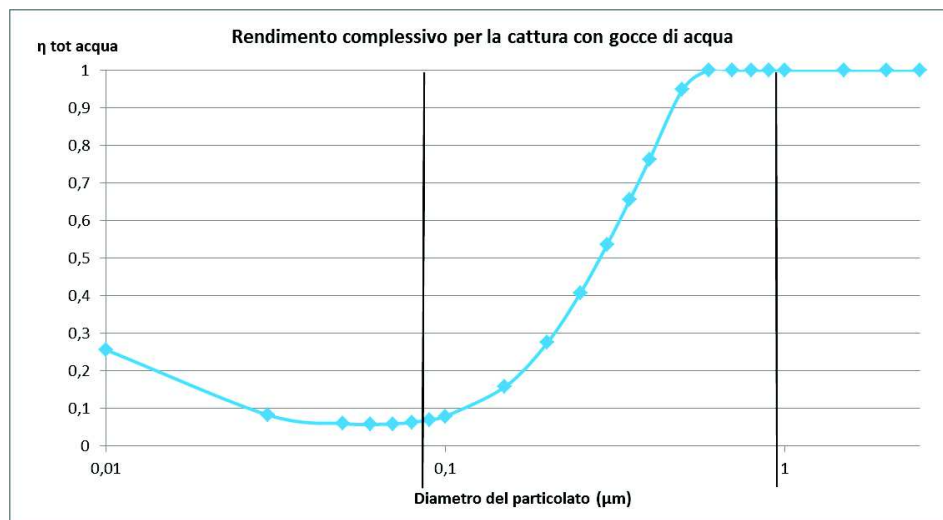


Figura 5.52 Andamento del rendimento complessivo di filtrazione con gocce di acqua, secondo il modello di Lee, al variare della dimensione delle gocce  $D_p$ , con i parametri della configurazione con effetto Venturi. L'impatto fa aumentare il rendimento per dimensioni  $D_p$

Inserendo la distribuzione granulometrica di ottiene una stima dell'efficienza di filtrazione a livello matematico, che risulta pari al **56%**, molto vicina a quella ottenuta sperimentalmente pari a 60%.

Le applicazioni del modello ai casi testati in precedenza, il cui fenomeno di cattura corrisponde a quello delle equazioni, conferma che le efficienze calcolate possono descrivere effettivamente la rimozione del particolato, in quanto forniscono paragonabili a quelli ottenuti sperimentalmente.

## *6. Progettazione e realizzazione*

Nel corso del dottorato si sono testate differenti soluzioni.

Inizialmente si è cercato di integrare il contributo della torre di lavaggio con i benefici di un media filtrante dalle ridotte perdite di carico: l'idea iniziale è stata quella di realizzare attraverso l'accrescimento eterogeneo un aumento delle dimensioni delle particelle in maniera tale che potessero essere catturate anche con un tessuto filtrante inizialmente non indicato per polveri sottili (esempio filtri per cabine di verniciatura).

Dai risultati ottenuti in termini di consumi ed efficienza di cattura sono state studiate e realizzate le soluzioni impiantistiche meglio sembrano raggiungere gli obiettivi di progetto.

### **6.1 Torre di lavaggio ad ugelli contrapposti**

Il primo sistema di filtrazione dei fumi progettato basa il suo funzionamento sull'interazione di più meccanismi di cattura del particolato; gli elementi principali consistono in una torre di lavaggio all'interno della quale tre coppie di ugelli (di cui il primo a cono vuoto ed il secondo a cono pieno) nebulizzano una portata d'acqua necessaria primariamente a saturare la corrente di fumi in arrivo dalla caldaia e secondariamente come primo fronte di abbattimento delle polveri sottili. A valle della torre di lavaggio sono installati due ventilatori ed un media filtrante in tessuto. Il tessuto filtrante appartiene alla classe di filtrazione G4 (CEN EN 779) ed è adatto per particelle superiori a 10  $\mu\text{m}$ , nel caso di particelle di piccola dimensione la sua efficienza scende velocemente (es per particelle da 1  $\mu\text{m}$  la sua efficienza di cattura è compresa nel range 15 ÷ 35 %).

Far passare i fumi in un ambiente saturo di umidità innesca il fenomeno della nucleazione eterogenea dei vapori saturi sulle particelle di particolato che quindi si comportano come nuclei di accrescimento; in questa maniera le particelle di particolato aumentano la loro dimensione facendo sì che vengano raccolte sul media filtrante.

I meccanismi che sono stati valutati in questo impianto sono stati:

- i. Influenza della portata di acqua nella torre di lavaggio (wet scrubber)
- ii. La realizzazione dei meccanismi di condensazione e coalescenza

iii. L'uso combinato di differenti media filtranti a valle della torre di lavaggio

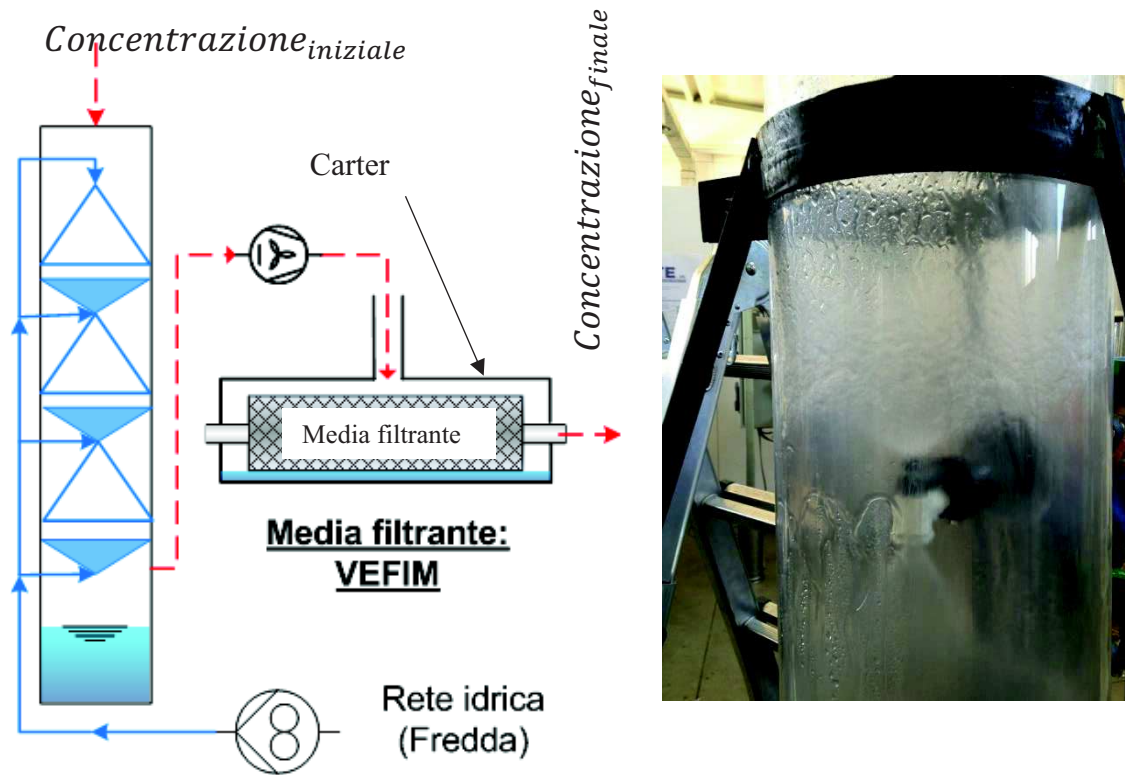


Figura 6.1 PFD Torre di lavaggio ad ugelli contrapposti

Nel caso preso in esame i fumi arrivano dalla caldaia con una temperatura di 100°C. Se non si fornisce acqua nella torre di lavaggio e si lascia che i fumi raffreddino lungo il condotto fino ad arrivare al tessuto, si nota che l'efficienza di filtrazione è del 12% ovvero paragonabile con l'efficienza di filtrazione del tessuto testato.

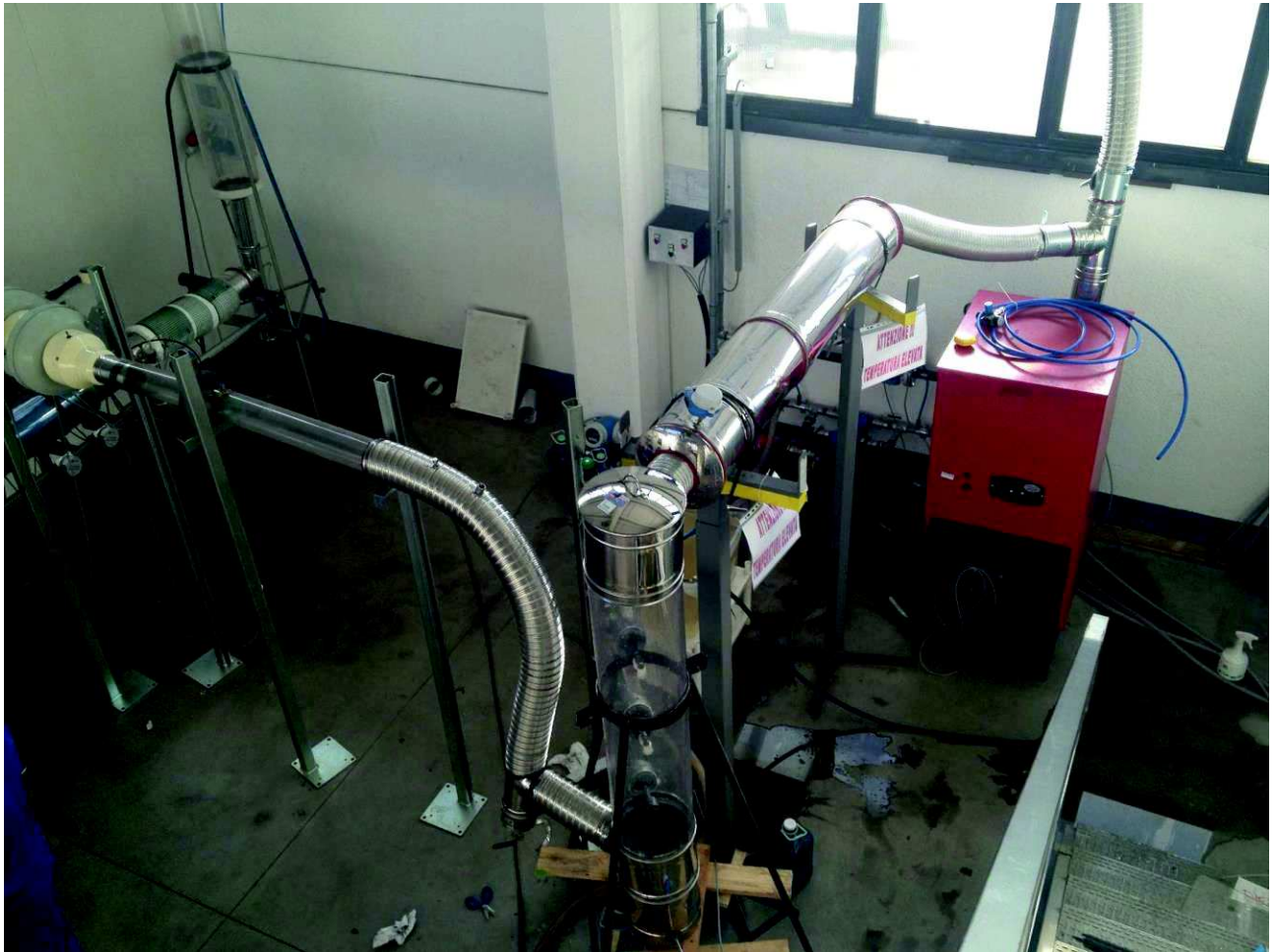


Figura 6.2 Impianto sperimentale allestito, evidenziata in rosso la torre di lavaggio

Con questa soluzione impiantistica non è stata però valutato il contributo dato dalla



condensazione in quanto la temperatura dei fumi scende violentemente all'interno della torre di lavaggio (in torre di lavaggio viene infatti nebulizzata acqua a 18°C).

Per poter valutare il contributo dato dalla condensazione si è modificato il circuito secondo quanto riportato nello schema seguente. Nebulizzando una portata d'acqua minima alla temperatura di 40°C si è arrivato con la corrente dei fumi in condizione di incipiente condensazione a monte dei ventilatori, dopo di che i motori dei ventilatori ne incrementano la temperatura fino a 56.5°C.

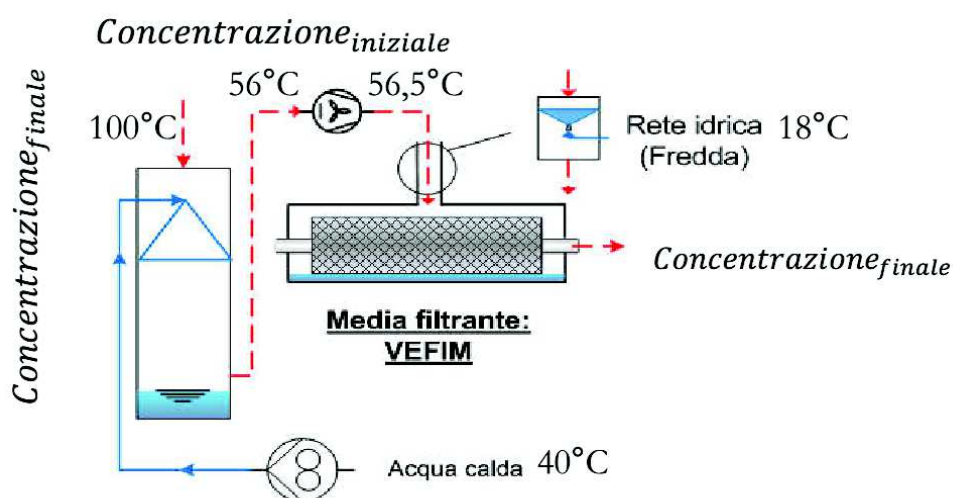


Figura 6.3 Schema per la valutazione dell'effetto di condensazione

A questo punto un ugello posto a valle dei ventilatori nel condotto verticale in ingresso al carter del filtro, inietta una portata di 0.13 m<sup>3</sup>/h di acqua a 18°C.

In questa maniera, grazie al calo di temperatura ed all'aumento di pressione si assiste al fenomeno della condensazione e della coalescenza sul media filtrante stesso.

Prova effettuata	Portata acqua elaborata	Efficienza di filtrazione $\eta$
Efficacia del solo tessuto	0 m <sup>3</sup> /h	12%



Efficacia effetto di condensazione in combinazione tessuto	0,13 m <sup>3</sup> /h	13 %
------------------------------------------------------------	------------------------	------

Dai dati riportati si ottiene che l'effetto condensazione/coalescenza non porta miglie sensibili.

Oltre al filtro Vefim si sono valutati altri due tipi di media filtranti forniti dalla ditta Donaldson che garantiscono un'efficienza di filtrazione pari al 99.999% con particelle da 0.5µm: il primo media filtrante si chiama Torit-TEX, il secondo Ultraweb on Spun Bond.

Prodotto	Ultra-Web su Spunbond	Torit-TEX
<b>Base media</b>	Calandrato poliestere a filo continuo (spunbond)	Calandrato poliestere a filo continuo (spunbond)
<b>Rilascio di particelle superiori</b>	Nanofibre. La tecnologia nanofibre fornisce un'efficienza di filtrazione iniziale fino a 10 volte superiore rispetto ai supporti convenzionali utilizzando un unico strato di fibre submicrometriche sulla superficie dei media.	Membrana in Tetratex® ePTFE. La membrana in PTFE Tetratex® è composta da milioni di piccole fibre collegate in modo casuale che creano dei pori dalle dimensioni estremamente ridotte capaci di respingere l'acqua, consentendo l'aria e l'umidità del vapore di passare.
<b>Lavabilità</b>	Una sola volta	Parecchie volte
<b>Massima temperatura di esercizio</b>	93° C	93° C
<b>Caratteristiche particolari</b>	La grande spaziatura fra le pieghe consente la pulizia approfondita ad impulso degli agglomerati di polvere nelle fibre. Si raggiungono alte efficienze paragonabili con i prodotti a membrana ad un prezzo inferiore.	L'ampia spaziatura fra le pieghe e la membrana in ePTFE (liscia ed idrorepellente) consente un'eccellente separazione delle particelle.
<b>Permeabilità (DIN53887)</b>	80 l/dm <sup>2</sup> /min a 200Pa	21 l/dm <sup>2</sup> /min a 200Pa

**Tabella 6.1 Caratteristiche tecniche di alcuni tessuti testati**

I test sono stati effettuati alle medesime condizioni degli altri test con i seguenti risultati.

Media filtrante	Efficienza di cattura
Ultra-Web su Spunbond	65.9 %
Torit-Tex	32.7%

Dall'analisi dei risultati si è ottenuto:

- L'effetto di condensazione è molto contenuto a causa dell'eccessiva permeabilità del tessuto filtrante adottato (VEFIM) ed alla difficoltà di condurre i fumi saturi in stato di incipiente condensazione fino al tessuto filtrante
- L'efficienza di filtrazione è proporzionale alla portata di acqua elaborata
- I filtri a tessuto eccessivamente permeabili non forniscono un contributo reale
- I filtri a tessuto con una bassa permeabilità, seppure effettuino una forte filtrazione, si intasano facilmente (filtri metallici) o non lavorano bene in un ambiente umido (filtri nanometrici)

Osservando il basso apporto fornito dai media filtranti a tessuto l'attività si è quindi concentrata sull'aumento dell'efficienza di filtrazione attraverso la torre di lavaggio.

Si è valutato che il maggior impedimento della torre di lavaggio testata fosse la ridotta probabilità che il fumo, e quindi il particolato, venisse in contatto con il fluido a causa del basso grado di riempimento generato tramite gli ugelli.

Da queste considerazioni è nata la soluzione impiantistica successivamente testata.

## 6.2 Atomizzazione con effetto Venturi e battente d'acqua

Prendendo le mosse dai risultati ottenuti nella precedente soluzione impiantistica testata, l'obiettivo è ora quello di massimizzare la miscelazione dei fumi con l'acqua all'interno della torre di lavaggio.

In questa soluzione impiantistica presenta un punto di miscelazione fra i fumi in uscita dalla caldaia e un getto generato unico ugello che lavora ad alta pressione, 100bar.

Infatti partendo dalla formula di Bernoulli si ottiene che

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2)$$

Essendo  $v_2^2 > v_1^2$  si vede che il getto d'acqua genera una depressione sufficiente ad aspirare una portata di fumi.

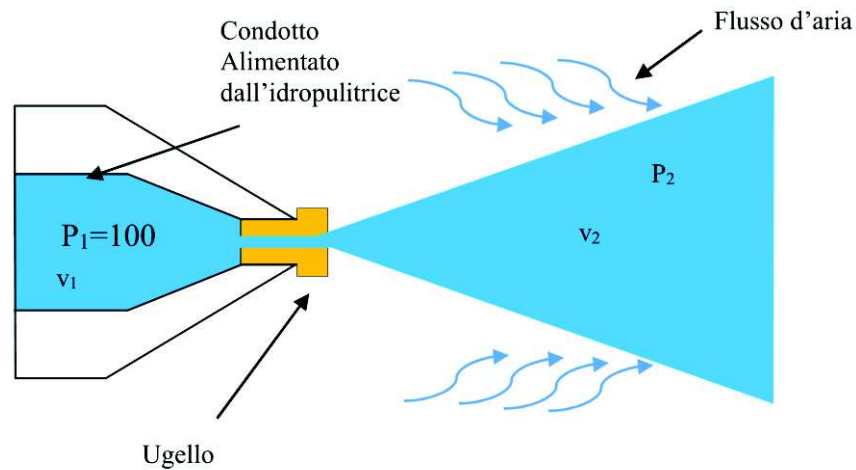


Figura 6.4 Schema dell'atomizzazione con effetto Venturi

In questa maniera aumentano notevolmente le possibilità di contatto fra l'acqua ed i fumi, essendo l'acqua il fluido vettore.

Prima di avviare l'attività sperimentale con i fumi dati dalla combustione della biomassa è stata eseguita una serie di test per identificare quali fossero le condizioni migliori di lavoro, di conseguenza è stato allestito un impianto sperimentale presso il laboratorio di impianti del dipartimento DIN.

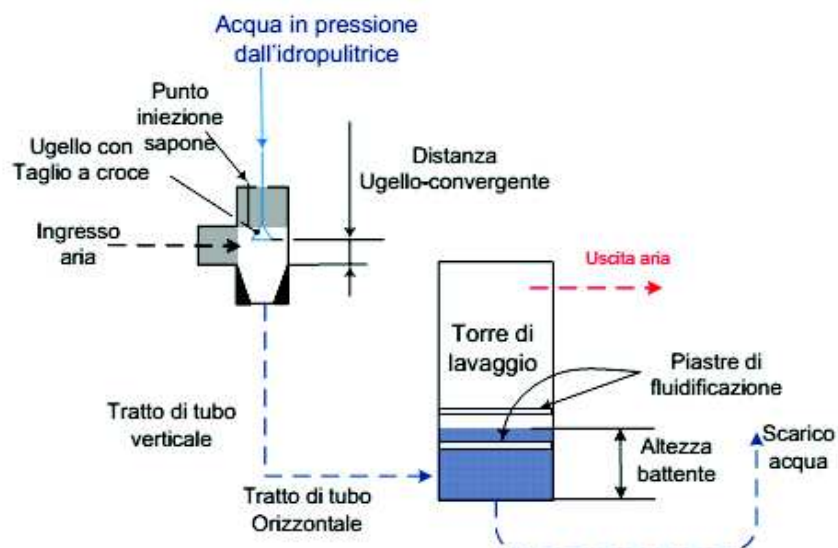


Figura 6.5 Schema test preliminari atomizzazione con effetto Venturi

Gli aspetti che hanno riguardato l'influenza dei seguenti parametri sulla portata di aria trasportata, sulla perdita di carico generata e sulla massima prevalenza generabile:

- Forma del getto dato dall'ugello. Influenza principalmente la portata di aria trasportata e la prevalenza attraverso il battente di acqua
- Distanza fra ugello e convergente
- Lunghezza dei tratti di tubo verticale ed orizzontale variando questo parametro si è cercato di valutare l'influenza delle perdite di carico generate
- Diametro dei tratti di tubo verticale ed orizzontale variando questo parametro di migliorare la miscelazione di fumi e acqua
- Altezza del battente d'acqua. L'acqua è il fluido di lavaggio della torre per cui aumentare il tempo di residenza dei fumi con l'acqua significa aumentarne l'efficienza di cattura. Aumentarne l'altezza influenza però la perdita di carico generata dal battente stesso e di conseguenza la portata di aria trasportabile
- Piastre di fluidificazione e dimensione delle bolle generabili. Considerando l'applicazione cui sono indirizzati i test è necessario ottenere bolle di piccole dimensioni al fine di aumentare la probabilità che le particelle di particolato all'interno della bolla stessa arrivino in contatto con il liquido di lavaggio. Come si può notare in Figura 6. nel primo caso il moto è più caotico e le l'aria trasportata rimane a contatto con l'acqua in meno possibile non avendo alcun ostacolo. La presenza delle piastre riesce a genere bolle di dimensioni minori favorendo però le perdite di carico che aumentano.



(a)



(b)

**Figura 6.6 Trasporto di aria per effetto Venturi, assenza di piastre di fluidificazione (a) e con piastre (b)**

Per questi test è stata usata una pompa ad alta pressione della Karcher con un meccanismo a pistoncini non regolabile capace di erogare a 100 bar una portata di 0.29 m<sup>3</sup>/h con un ugello particolare con taglio a croce realizzato in laboratorio.

Dai risultati ottenuti si è visto che l'influenza dei tratti di tubo orizzontale e verticale è minima per cui sono stati rimossi e si è posto l'ugello direttamente in posizione orizzontale, lo schema dell'impianto che si è ottenuto è quindi il seguente

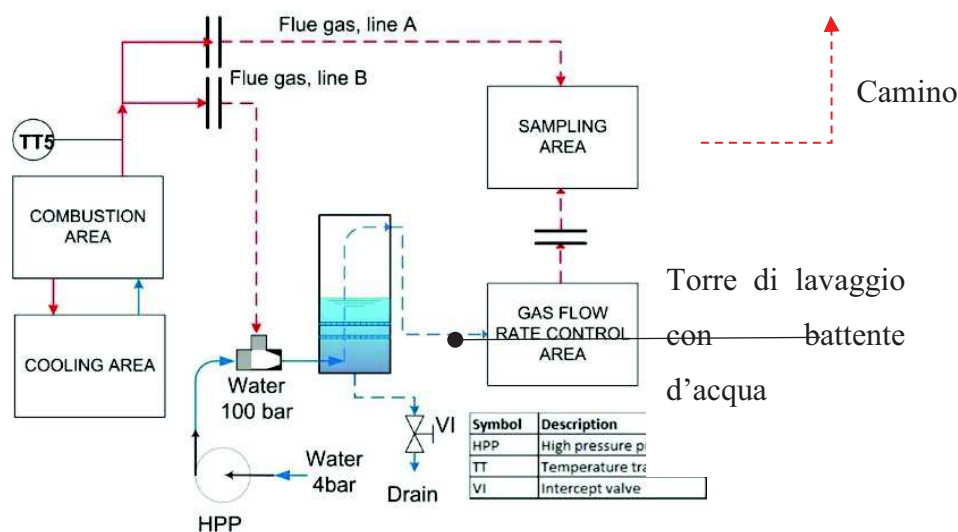


Figura 6.7 Schema impianto sperimentale per effetto Venturi e battente d'acqua

Gli effetti testati nell'impianto sono stati quindi i seguenti

- Sfruttamento dell'effetto Venturi generato da una pompa che invia un getto di acqua ad alta pressione (una portata di  $0.286 \text{ m}^3/\text{h}$  alla pressione di 100 bar). L'acqua in pressione aumenta la potenza di circolazione dei gas, fa crescere la loro turbolenza e li accelera.
- Si è poi analizzata la prestazione di una torre contenente una colonna di acqua: i fumi in uscita dalla caldaia sono obbligati ad attraversare un battente d'acqua. Rispetto ai casi precedenti questa soluzione riduce il grado di vuoto e consente un maggiore contatto tra acqua e fumi. L'efficacia varia con l'altezza del battente e con la capacità di frammentare il flusso dei fumi in bolle di piccole dimensioni in maniera da aumentare la superficie di contatto con il liquido; per questo scopo sono stati inseriti nel battente d'acqua due dischi retati con maglie da 0.5mm.
- L'utilizzo dell'pompa per alte pressioni, che determina una spinta per i fumi, consente anche un aumento del battente: si è perciò provata la configurazione che unisce l'effetto Venturi al battente di acqua.

La prima soluzione testata prevede il passaggio dei fumi attraverso un battente d'acqua, in questo caso la forza di superamento del battente è dato esclusivamente dal ventilatore della caldaia e dai due ventilatori posti a valle della torre di lavaggio: il massimo livello superabile in torre di lavaggio è pari a 150 mm d'acqua.

La seconda configurazione presenta il funzionamento per solo effetto Venturi senza alcun battente d'acqua in torre di lavaggio e con i ventilatori spenti in quanto la pompa garantisce la prevalenza necessaria per aspirare i fumi dalla camera di combustione e condurli fino al camino.

La terza configurazione funziona invece con il contributo combinato della pompa con un battente d'acqua senza alcun contributo dagli aspiratori: in questo caso il massimo battente d'acqua consentito in torre di lavaggio è pari a 250 mm di acqua.

L'ultima configurazione testata per questo impianto prevede invece il contemporaneo contributo della pompa per pressioni elevate, del battente d'acqua e dei due ventilatori posti a valle della torre di lavaggio: in questo caso il massimo battente d'acqua ottenibile in torre di lavaggio è pari a 360mm d'acqua.

I risultati in termini di efficienza in funzione del battente d'acqua sono riassunti nel

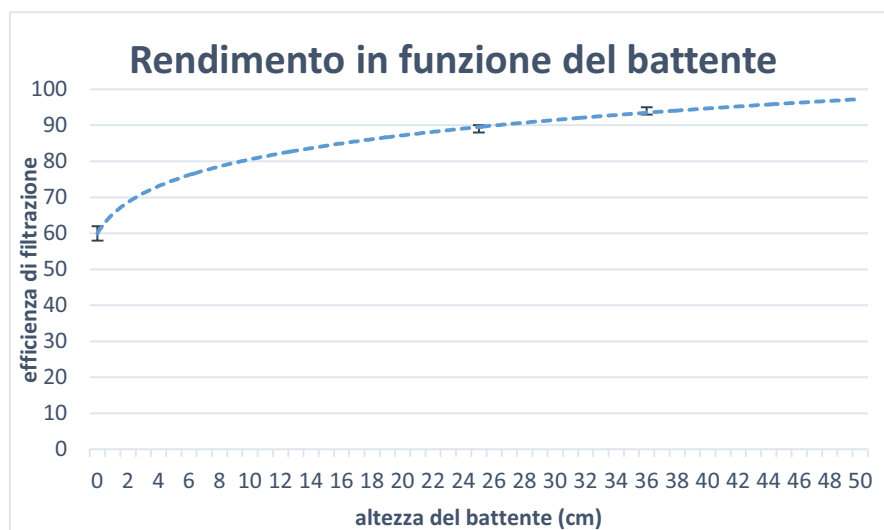


Figura 6.8 Andamento del rendimento in funzione del battente d'acqua presente in torre di lavaggio.

grafico sotto riportato

Con riferimento all'obiettivo finale, oltre al fattore efficienza di filtrazione bisogna tenere in considerazione i bassi consumi energetici, altrimenti non sarebbe adatto per l'applicazione in caldaie per il riscaldamento domestico a biomassa, che sono appetibili in virtù dei bassi costi



<b>Configurazione</b>	<b>Efficienza media sul PM2,5</b>	<b>Consumi energetici [W]</b>	<b>Portata d'acqua nebulizzata [m<sup>3</sup>/h]</b>	<b>Battente d'acqua [mm]</b>	<b>Consumo energetico specifico riferito alla portata di fumi [Wh/Nm<sup>3</sup>]</b>
Torre di lavaggio con ugelli	28.2%	330	1	-	10.6
Colonna di acqua	58.6%	354	0	150	11.4
Atomizzazione con effetto Venturi	60.4%	1700	0.29	-	54.8
Atomizzazione con effetto Venturi e battente d'acqua	89.7%	1944	0.29	250	62.7
Atomizzazione con effetto Venturi, battente d'acqua e contributo aspiratori	94.8%	2052	0.29	360	66.2

**Tabella 6.2 Risultati delle principali soluzioni testate**

## *7 Analisi dei risultati e progettazione dell'impianto sperimentale con parametri ottimizzati*

### **7.1 Analisi dei risultati ottenuti**

[12] [13] I principali parametri che influenzano l'efficienza di filtrazione del particolato in una torre di lavaggio sono:

I. **La portata di liquido utilizzato** (nel caso specifico acqua): in generale un elevato valore del rapporto fra la portata di acqua e quella dei fumi determina una maggiore efficienza, aumentano però i consumi di liquido e i costi relativi al suo pompaggio.

Dalle prove realizzate sull'impianto test si è visto inoltre che l'effetto dato dalla quantità di acqua è modesto: all'aumentare della portata di acqua utilizzata l'efficienza cresce ma non così sensibilmente.

II. **La velocità relativa tra gas e liquido** va aumentata per avere maggiore cattura del particolato, soprattutto sulle particelle di dimensione più grandi per le quali, in questo modo, viene favorito il fenomeno dell'impatto; al contrario per particelle di piccole dimensione non si ha necessità di velocità elevate. Naturalmente aumentare la velocità relativa significa aumentare le perdite di carico e quindi l'energia richiesta per il tiraggio dei fumi (gli aspiratori assorbono più energia).

Questo parametro è stato sfruttato nella configurazione con effetto Venturi, in cui la velocità relativa tra fumi e acqua è elevata, però appunto essa determina una potenza assorbita eccessiva per l'obiettivo che si è prefissato.

III. **Il grado di vuoto**, definito come il rapporto tra il volume occupato gas per l'attraversamento della torre e il volume geometrico dell'intera torre. Se il grado di vuoto è basso significa che l'area di passaggio dei fumi è limitata, quindi questi

vengono accelerati e ne viene favorita la turbolenza, aspetti che migliorano l'efficienza di cattura, ma aumentano le perdite di pressione nell'attraversamento della torre.

Nel caso di cattura realizzata con il battente di acqua, i fumi sono forzati ad attraversare la colonna di liquido, per cui il volume a disposizione per il loro passaggio è molto limitato: ciò determina un aumento rilevante dell'efficienza rispetto al caso di acqua iniettata dagli ugelli.

**IV. La dimensione delle gocce di acqua**, o in generale dell'elemento filtrante, è uno dei parametri fondamentali per la progettazione della torre di lavaggio: le gocce più piccole hanno un maggiore rapporto superficie/volume e quindi catturano più particelle a parità di volume di liquido iniettato. Non bisogna però esagerare perché se le gocce sono troppo piccole la velocità relativa tra liquido e gas cala e c'è il rischio che possano essere trascinate dai fumi.

Questo è l'altro vantaggio di lavorare con pressioni elevate, rispetto agli ugelli spruzzatori, si generano gocce di un ordine di grandezza minore: per fare questo però si necessita di 100 bar di pressione alla mandata, in parte usati anche per velocizzare il liquido, per cui richiede grandi potenze.

## **7.2 Atomizzazione con filtraggio a letto fisso**

Dalle considerazioni ottenute dalle precedenti versioni dell'impianto sperimentale si sono prese le mosse per realizzare il nuovo impianto. La principale innovazione consiste nell'introduzione all'interno torre di lavaggio di alcuni corpi di riempimento sferici che riducano il grado di vuoto favorendo così l'iterazione fra il liquido di lavaggio (acqua) ed il particolato contenuto nel flusso gassoso (i fumi).

I corpi di lavaggio saranno comunque accompagnati da un'atomizzazione di acqua che, in linea con le considerazioni fatte alla fine del paragrafo precedente, punterà maggiormente sulla nebulizzazione di gocce di ridotte dimensioni piuttosto che su un aumento eccessivo della portata.

Per quanto riguarda il rendimento di filtrazione dato dagli ugelli, ovvero dalle gocce di acqua si è già discusso profusamente nel capitolo 2.

L'efficienza di cattura complessiva con corpi di riempimento sferici è data invece dalla formula di seguito riportata la cui spiegazione e dimostrazione è riportata in appendice.

$$\eta_{tot\ letto} = 1 - e^{-E}, \text{ con } E = \frac{3 \alpha \eta Z}{2 (1-\alpha) D}$$

Da cui si deriva che i parametri da cui dipende l'efficienza globale del letto sono:

**Z.** più è alto lo strato di sfere e più è alto il tempo di residenza dei fumi dentro al letto; inoltre i gas vengono maggiormente mescolati ed entrano in contatto con le sfere e il film liquido, per cui l'efficienza di cattura complessiva aumenta con l'altezza del riempimento.

**$\alpha$ .** All'aumentare del grado di pieno, l'efficienza globale aumenta, perché, a pari dimensione delle sfere e altezza del letto, se la frazione di volume occupata dal riempimento è maggiore, il numero delle sfere è più grande e quindi anche la superficie di contatto. Inoltre i fumi hanno meno spazio per il passaggio, per cui vengono accelerati e ne viene favorita la turbolenza.

**D.** Allo stesso modo, a pari grado di pieno e altezza del letto, se la dimensione delle sfere è più contenuta, significa che nel letto ne è presente una quantità maggiore e quindi l'efficienza aumenta. Infine se la dimensione delle sfere è ridotta, aumenta la superficie di scambio tra liquido e gas.

Su questa configurazione sono stati svolti test parziali, senza variare i parametri (portata di acqua, altezza del letto, grado di vuoto) e soprattutto utilizzando materiale già a disposizione (ugelli spruzzatori e palline in polipropilene di diametro pari a 3 mm).

Questa configurazione allora è stata poi rivalutata da un punto di vista matematico, ripercorrendo i parametri sopra descritti in modo da determinare i valori che permettano di raggiungere l'efficienza desiderata ( $\eta > 99\%$ ), tenendo in considerazione i consumi energetici.

In questa configurazione della torre, la cattura del particolato avviene in maniera diversa nelle due zone che la caratterizzano:

- 1) i fumi attraversano una regione in cui incontrano acqua iniettata che forma delle gocce;
- 2) i fumi passano poi da una seconda regione dove la cattura avviene tramite il film di acqua che ricopre i corpi di riempimento sferici.

La stima dell'efficienza allora viene effettuata su entrambe le zone, pensando che poi queste realizzino la rimozione del particolato agendo in serie.

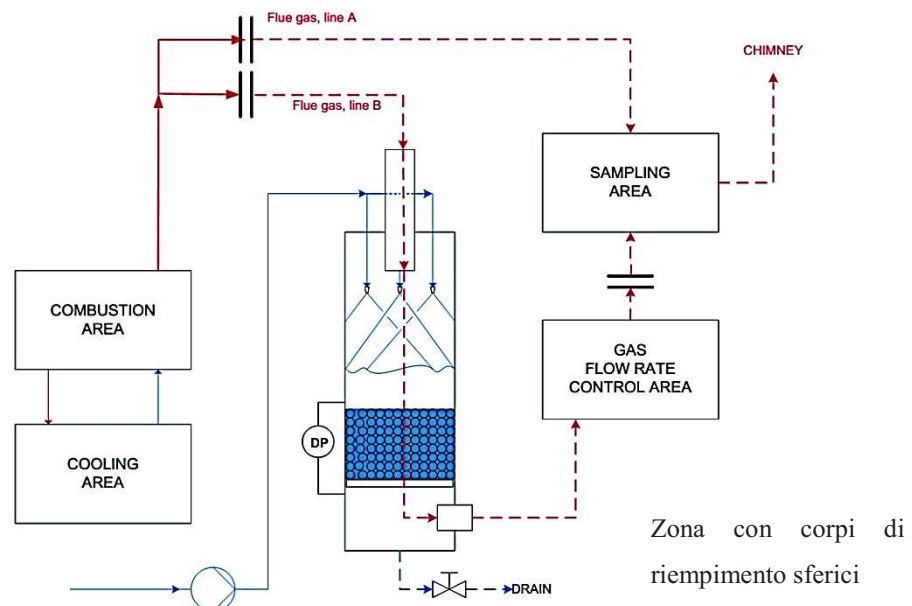


Figura 7.1 Schema dell'impianto di Atomizzazione con filtraggio a letto fisso

Per cui al momento la soluzione testata presenta 15 ugelli spruzzatori della ditta NGF che nebulizzano goccioline del diametro di  $10\ \mu\text{m}$  (contro i  $150\ \mu\text{m}$  della torre di lavaggio ad ugelli contrapposti).

Gli ugelli sono divisi in rami indipendenti da 5 ugelli l'uno in modo tale che possano elaborare a 80 bar da 0.25 l/min fino a 0.75 l/min.

Per quanto riguarda lo strato di sfere esso è al momento costituito da sfere di diametro  $D$  pari a 3mm depositate in uno strato di altezza  $Z$  uguale a 10cm.

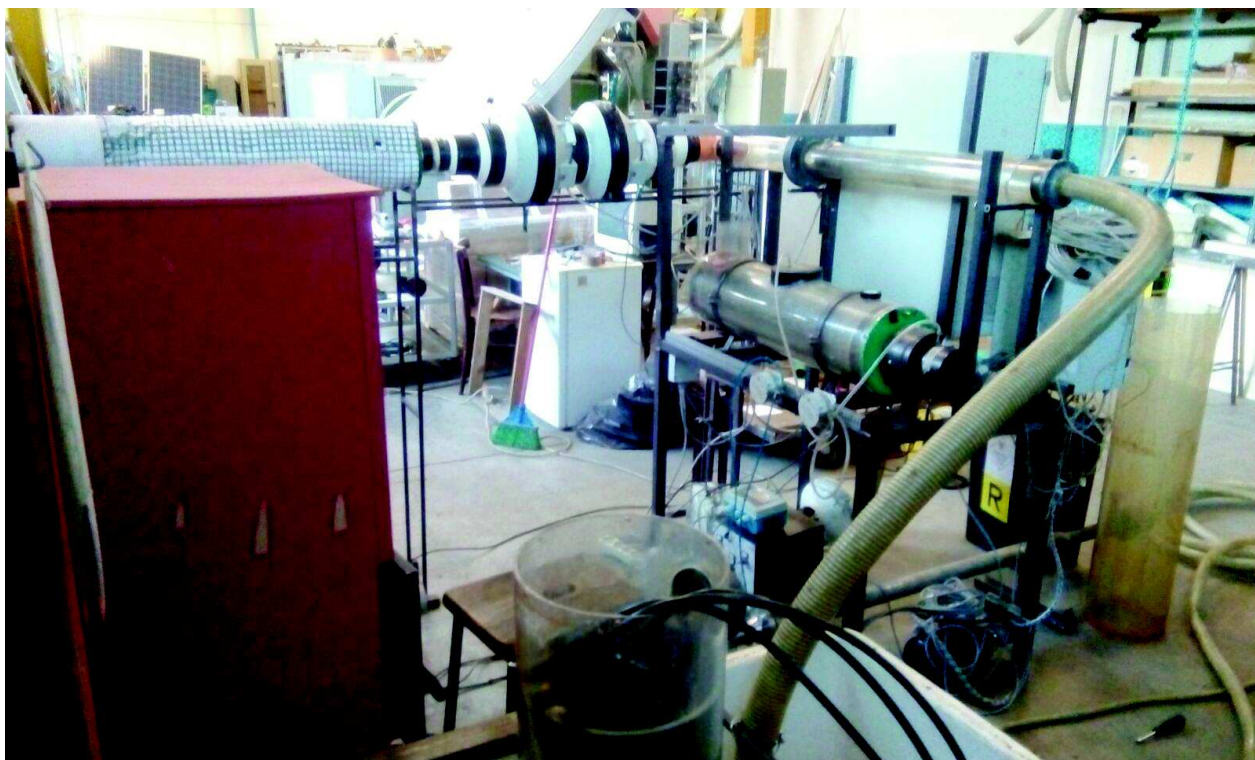


Figura 7.2 Foto dell'impianto allestito presso il laboratorio DIN dell'Università di Bologna



Figura 7.3 Particolare impianto; corpi di riempimento sferici



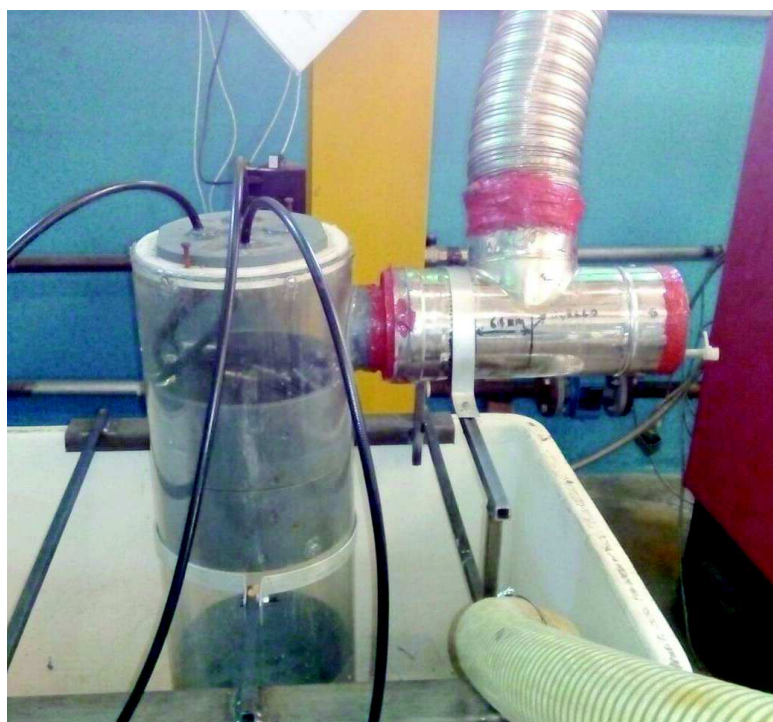
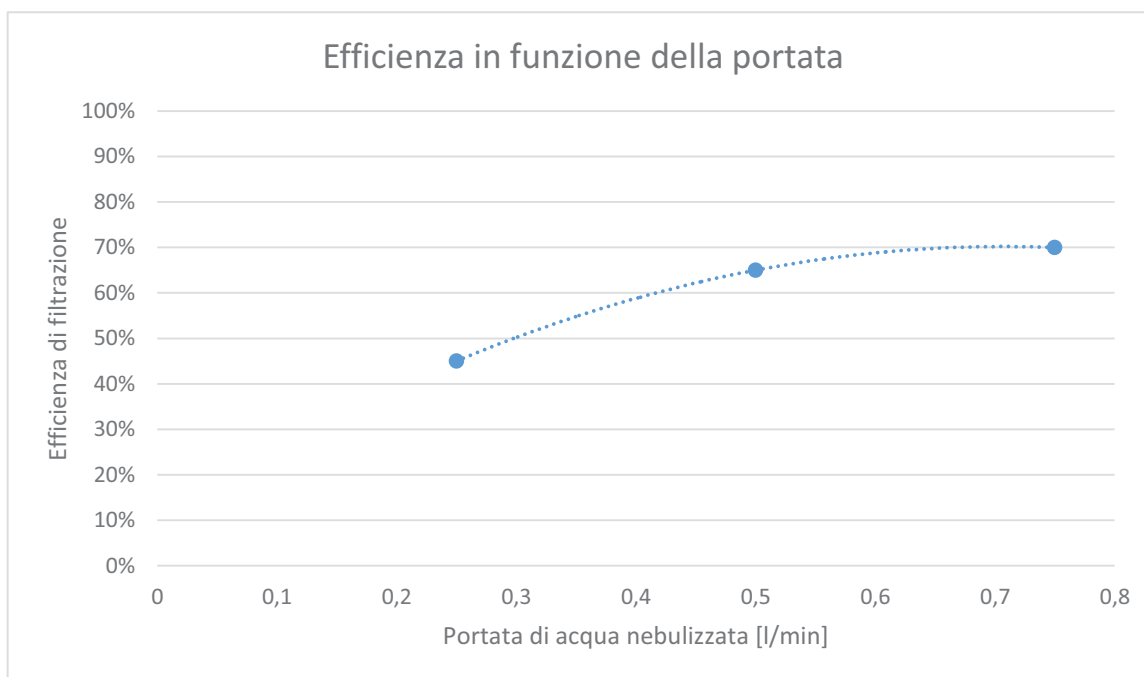


Figura 7.4 Torre di lavaggio con ingresso dei fumi dall'alto



Figura 7.5 Disposizione dei 15 nebulizzatori all'interno della torre di lavaggio



**Tabella 7. 1 Andamento del rendimento in funzione della portata di acqua atomizzata con presenza di uno strato di corpi di riempimento sferici  $Z=10\text{cm}$**

Il risultato, se confrontato con quello della torre di lavaggio ad ugelli contrapposti è estremamente positivo: nel caso della torre di lavaggio l'efficienza ottenuta era solo 28% a fronte di una portata d'acqua di quasi 17 l/min, ora con una portata quasi 20 volte inferiore l'efficienza è migliorata del 250%. Se facciamo riferimento al grafico in Figura 6.26 si nota come il contributo dato dai corpi sferici con diametro 3mm sia praticamente nullo nella zona di lavoro in cui si si trova, ovvero per particolato compreso fra 0.1 e 1  $\mu\text{m}$ ; per cui il l'aumento di efficienza è dato quasi esclusivamente dall'acqua nebulizzata in gocce da 15 $\mu\text{m}$ . Anche le perdite di carico sono molto contenute e nel caso esaminato si attestano sui 600 Pa.

Allo stato attuale questi sono i risultati ottenuti con questa soluzione impiantistica che comunque deve essere ancora approfondita in particolare è necessario testare sfere di diametro D molto inferiore (0.5mm) in combinazione con differenti portate.



### 7.3 Ottimizzazione dei parametri di progettazione della nuova configurazione della torre di lavaggio

Sapendo che le equazioni del modello possono essere considerate rappresentative di ciò che accade nella torre, si indaga per determinare quali siano i parametri su cui intervenire per raggiungere le caratteristiche desiderate di efficienza e consumi.

Partendo sempre dalla granulometria, la cui conoscenza, come si è più volte detto, costituisce la prima fase della progettazione di un sistema di filtrazione, si può notare che, essendo la distribuzione della dimensione del particolato, compresa per la maggior parte tra 0,1 e 2,5  $\mu\text{m}$  (dato derivante dalla letteratura e confermato dai test con il multi-impattore), il meccanismo prevalente è l'intercettazione.

Con lo scopo di scegliere come valori delle grandezze, quelli che favoriscono questo meccanismo, si analizzano più in dettaglio le relazioni del modello riguardanti proprio l'intercettazione, per entrambi le regioni della nuova configurazione della torre.

#### 7.3.1 Ottimizzazione dei parametri per la cattura con gocce di acqua

Per la regione della torre che cattura il particolato tramite gocce di acqua, il modello di Lee fornisce come rendimento per intercettazione la relazione:

$$\eta_{int} = \frac{1 - \alpha}{J + \sigma K} \left[ \left( \frac{R}{1 + R} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{R}{1 + R} \right)^2 (3\sigma + 4) \right]$$

Allora le variabili su cui si può agire per massimizzarlo sono:

$\alpha$  grado di pieno: nel caso delle gocce di acqua questo parametro dipende dalla portata dei sistemi che formano lo spray di liquido;

$\sigma$  rapporto tra viscosità di acqua e fumi, ma al variare del rapporto di viscosità  $\sigma$ , il cambiamento del rendimento è praticamente trascurabile;

$R$  parametro di intercettazione, che invece incide molto sul rendimento ed è dato da:

$$R = \frac{D_p}{D}$$

Nomenclatura		Unità di misura	Andamento	$\eta_{int}$	Caratteristiche
$R$	parametro di intercettazione	-	↑	↑	$R$ è alto se le gocce sono piccole ( $d$ basso) perché ci sono più traiettorie intercettate.
$\alpha$	frazione di acqua nella torre	-	↑	↑	Se $\alpha$ cresce si hanno più gocce e quindi più traiettorie intercettate.
$\sigma$	rapporto tra viscosità di liquido e gas	-	↑	↓	Un liquido meno viscoso aumenta la filtrazione del particolato.

**Tabella 7. 2 Parametri che influiscono sul rendimento di intercettazione per la cattura con gocce di acqua secondo il modello di Lee.**

Nomenclatura		Unità di misura	Andamento	$R$	$\eta_{int}$	Caratteristiche
$d$	diametro della goccia	m (o $\mu\text{m}$ )	↑	↓	↓	Gocce più piccole determinano più traiettorie intercettabili.
$dp$	diametro del particolato	m (o $\mu\text{m}$ )	↑	↑	↑	Il particolato più grande viene intercettato meglio.

**Tabella 7.3 Parametri che influiscono sul coefficiente di intercettazione e sul rispettivo rendimento per la cattura con gocce di acqua secondo il modello di Lee.**

Per quanto riguarda il contributo delle gocce d'acqua ne deriva che per aumentare il rendimento di intercettazione bisogna diminuire sia il grado di vuoto (è lo stesso che dire aumentare il grado di pieno), sia la dimensione delle gocce.

Si analizzano allora gli effetti di questi due parametri.

- Grado di pieno

Il grado di pieno va aumentato, ossia la porzione dello scrubber occupata dall'acqua deve aumentare, diminuendo così il volume di passaggio a disposizione dei fumi: questo risultato è ottenibile aumentando la portata di acqua.

Si sono valutati allora due casi: uno con grado di pieno pari a 0,5 e l'altro con grado di pieno 0,8. Con questi valori si è entrati nuovamente nel modello, che ha fornito i seguenti risultati.

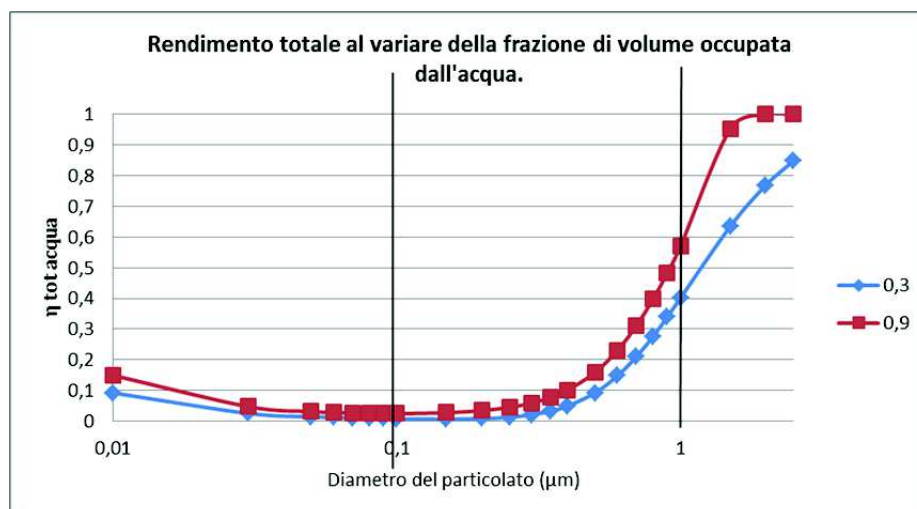


Figura 7.6 Andamento del rendimento totale con gocce di acqua in funzione della dimensione  $D_p$  al variare della frazione di volume occupata dall'acqua (da 0,3 a 0,9).

Si può notare che il grado di pieno incide gradualmente a partire dalla dimensione del particolato di  $0,5 \mu\text{m}$ , fino a dare un aumento del 15% sul rendimento relativo a  $1 \mu\text{m}$ . Poiché però l'effetto positivo di  $\alpha$  comincia per dimensioni del particolato superiori a  $1 \mu\text{m}$ , presenti in quantità ridotta nei fumi da biomassa, il rendimento totale del filtro non cambia in maniera sensibile.

- Dimensione delle gocce

Un effetto maggiore è invece dato dalla dimensione delle gocce: se questa diminuisce, il rendimento di intercettazione, e di conseguenza quello totale, crescono nell'intervallo di interesse.

In particolare se ne vede l'effetto passando da una dimensione delle gocce di  $150 \mu\text{m}$  ad una di  $15 \mu\text{m}$ .

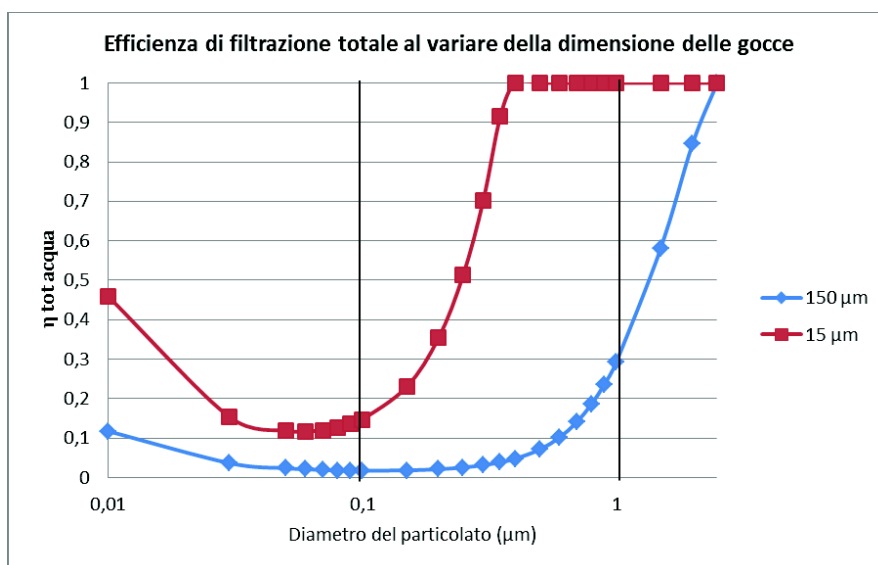


Figura 7.8 Andamento del rendimento totale con gocce di acqua in funzione della dimensione  $D_p$  al variare della dimensione delle gocce di acqua (da 150  $\mu\text{m}$  a 15  $\mu\text{m}$ ).

Con gocce più piccole (15  $\mu\text{m}$ ) il rendimento globale di cattura va a 1 già per il particolato di diametro pari a 0,5  $\mu\text{m}$ , mentre nel caso di gocce più grandi (150  $\mu\text{m}$ ), per  $D_p=5 \mu\text{m}$  si ha un'efficienza globale del 7%.

Si può notare che all'interno dell'espressione del rendimento di intercettazione non compare la velocità relativa tra acqua e fumi, per cui l'efficienza per questo meccanismo non migliora se le gocce di acqua sono più veloci.

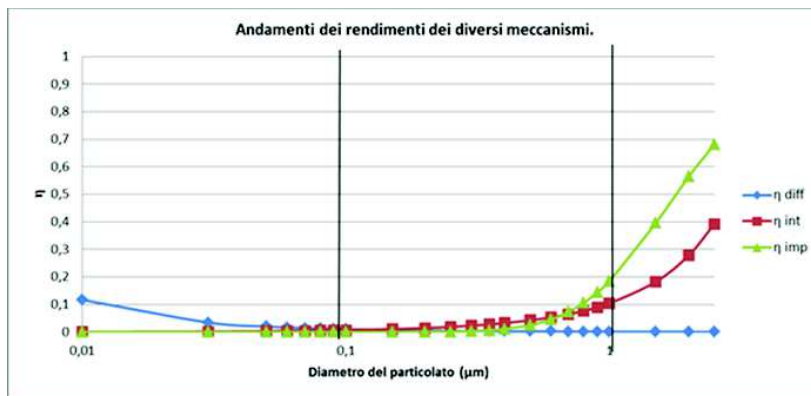
La presenza di un'elevata velocità relativa è stata considerata uno dei punti positivi dell'atomizzazione con effetto Venturi, con cui si erano ottenute efficienze elevate. In realtà il modello mostra che alte velocità relative migliorano l'efficienza per impatto, ma non favoriscono gli altri meccanismi.

Infatti se si aumenta la velocità relativa, il rendimento cresce, ma solo per diametri del particolato maggiori di una certa dimensione.

Se invece diminuisce la dimensione delle gocce, l'efficienza si alza anche per diametri di particolato minori, perché  $D$  (dimensione delle gocce) influenza tutti e tre i meccanismi di cattura, migliorandoli.

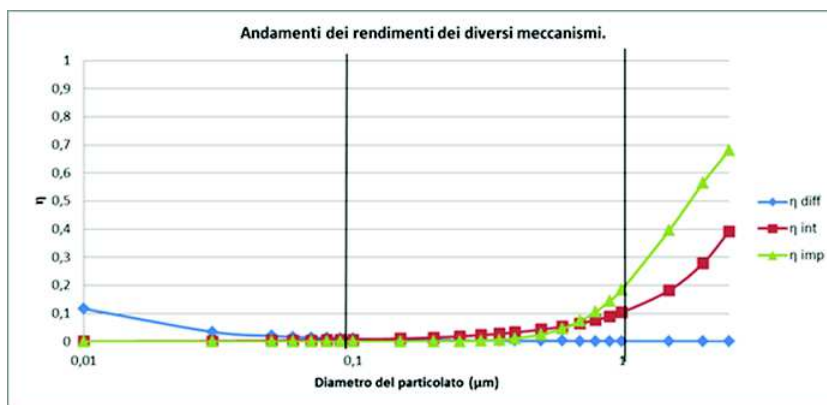
Per rendersi conto che diminuire la dimensione delle gocce ha più effetto rispetto ad aumentare la velocità relativa tra acqua e fumi, si è applicato il modello a tre situazioni diverse:

- I. Nella prima si sono determinati gli andamenti dei rendimenti dei tre meccanismi usando come parametri  $D = 150 \mu\text{m}$  e  $U_r = 12 \text{ m/s}$ , valori tipici della configurazione “Torre di lavaggio con ugelli”
- II. Per la seconda si è analizzato l’effetto della velocità relativa, aumentandola a  $75 \text{ m/s}$ , mantenendo invece la stessa dimensione delle gocce,  $D = 150 \mu\text{m}$
- III. Infine nella terza si è indagato l’effetto della dimensione delle gocce, che è stata diminuita a  $15 \mu\text{m}$ , riportando la velocità relativa al valore iniziale  $U_r = 12 \text{ m/s}$ .



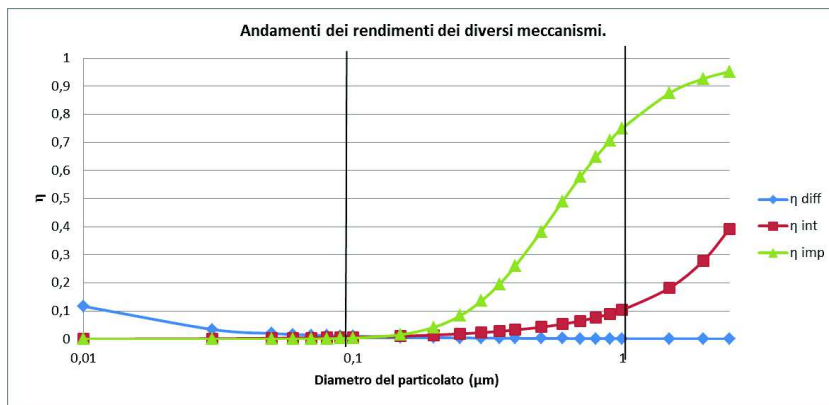
$D = 150 \mu\text{m}$

$U_r = 12 \text{ m/s}$



$D = 150 \mu\text{m}$

$U_r = 75 \text{ m/s}$



$D = 15 \mu\text{m}$   
 $U_r = 12 \text{ m/s}$

Figura 7.9 Andamento dei rendimenti dei tre meccanismi di cattura con gocce di acqua in funzione di  $D_p$  per valutare l'effetto del diametro delle gocce e della velocità relativa dell'acqua

In questo modo si nota che all'aumentare della velocità relativa (come nel caso del sistema Venturi), diventa più alto il rendimento per impatto che però inizia ad avere effetto da dimensioni del particolato di  $0,2 \mu\text{m}$ , mentre il rendimento di intercettazione rimane piuttosto basso.

Invece al diminuire del diametro delle gocce, l'efficienza di intercettazione inizia ad avere valori accettabili già da dimensioni del particolato pari a  $0,1 \mu\text{m}$ , ma soprattutto va a 1 proprio all'interno della zona di interesse a partire da  $D_p = 0,5 \mu\text{m}$ . Anche il rendimento di impatto migliora, seppur in maniera minore rispetto al caso di velocità elevate, ma sempre per via della diminuzione della dimensione delle gocce.

Allora ne risulta che l'effetto sul rendimento complessivo è più evidente se si realizzano gocce più piccole.

### 7.3.2 Ottimizzazione dei parametri per la cattura con corpi sferici

La stessa cosa si fa per la parte in cui la cattura viene realizzata con corpi di riempimento sferici, concentrandosi sempre sull'efficienza per intercettazione:

$$\eta_R = 1.5 \frac{1 - \alpha}{K} \frac{R^2}{(1 + R)^\gamma}$$

Anche in questo caso i parametri influenti sono:

$\alpha$  - la frazione della torre occupata dalle sfere incide sul rendimento, variabile da impostare e da aumentare per migliorare il rendimento di intercettazione;

$R$  - il parametro di intercettazione, anche in questo caso, influisce molto sulla cattura per intercettazione e va aumentato.

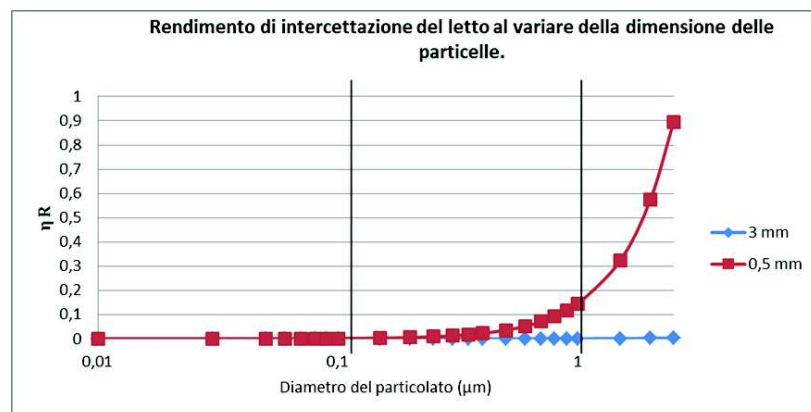
Nomenclatura		Unità di misura	Andamento	$\eta_R$	Caratteristiche
$R$	parametro di intercettazione	-	↑	↑	$R$ è alto se le particelle sono piccole ( $d$ basso) e ci sono più traiettorie intercettabili.
$\alpha$	frazione occupata dalle particelle nella torre	-	↑	↑	Se $\alpha$ cresce si hanno più traiettorie che possono essere intercettate.

**Tabella 7. 4 Parametri che influiscono sul rendimento di intercettazione per la cattura con corpi di riempimento sferici secondo il modello di Lee.**

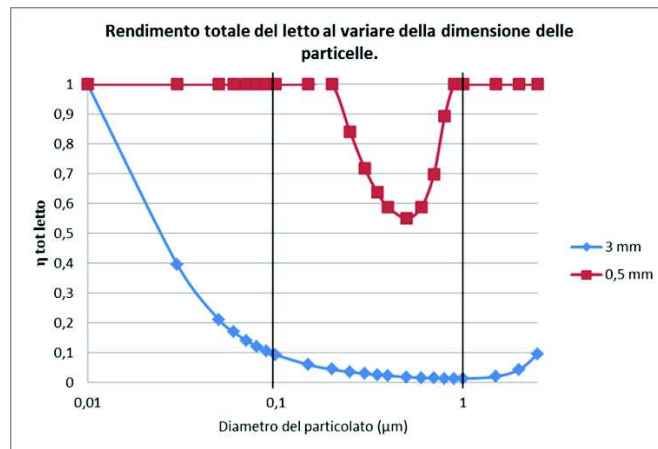
Nomenclatura		Unità di misura	Andamento	$R$	$\eta_R$	Caratteristiche
$d$	diametro della particella	m (o $\mu\text{m}$ )	↑	↓	↓	Elementi filtranti più piccoli determinano più traiettorie intercettabili.
$dp$	diametro del particolato	m (o $\mu\text{m}$ )	↑	↑	↑	Il particolato più grande viene intercettato meglio.

**Tabella 7. 5 Parametri che influiscono sul coefficiente di intercettazione e sul rispettivo rendimento per la cattura con corpi di riempimento sferici secondo il modello di Lee**

Se diminuisce il diametro  $D$  degli elementi filtranti che costituiscono il letto fluido, passando per esempio da 3 mm a 0,5 mm, Si ottengono i grafici seguenti.



**Figura 7.10 Andamento del rendimento di intercettazione con corpi di riempimento sferici in funzione della dimensione  $D_p$  al variare della dimensione delle sfere (da 3 mm a 0,5 mm).**



**Figura 7.11 Andamento del rendimento totale con corpi di riempimento sferici in funzione della dimensione  $D_p$  al variare della dimensione delle sfere (da 3 mm a 0,5 mm).**

Il rendimento di intercettazione aumenta ma per dimensioni piuttosto elevate del particolato ( $0,7 \mu\text{m}$ ).

A migliorare molto è invece il rendimento totale, perché diminuendo il diametro delle sfere, migliorano anche diffusione ed impatto: infatti l'efficienza totale di filtrazione va a 1 sia per il particolato molto piccolo ( $<0,2 \mu\text{m}$ ) che per particolato piuttosto grande ( $>0,9 \mu\text{m}$ ).

- Per quanto riguarda il grado di pieno, questo ha un effetto più limitato. Si pensa di diminuire lo spazio a disposizione dei fumi, non variando numero o volume delle particelle, ma variando la quantità di acqua: aumentando la portata di acqua si può passare da un grado di pieno di 0,5 a uno pari a 0,8.



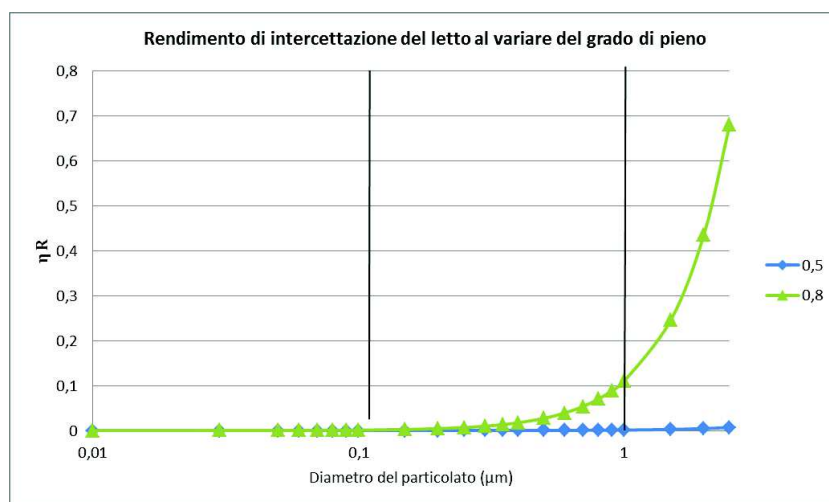


Figura 7.12 Andamento del rendimento di intercettazione con corpi di riempimento sferici in funzione della dimensione  $D_p$  al variare del grado di pieno (da 0,5 a 0,8).

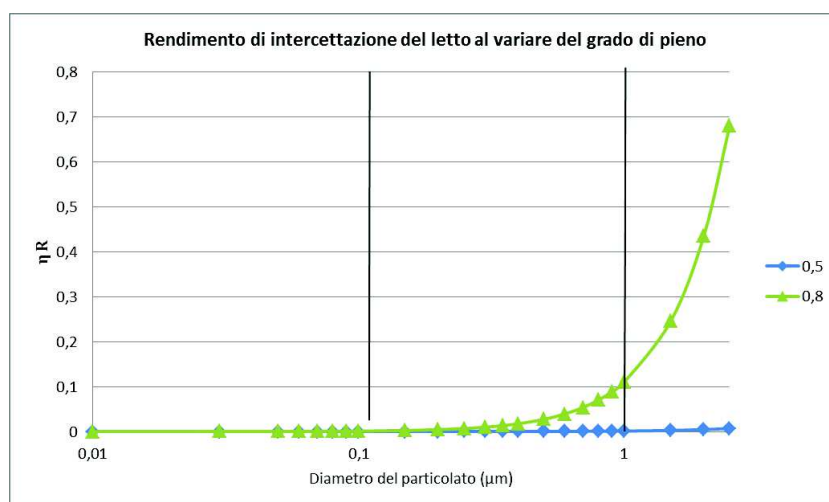


Figura 7.13 Andamento del rendimento totale con corpi di riempimento sferici in funzione della dimensione  $D_p$  al variare del grado di pieno (da 0,5 a 0,8).

Anche per questa variabile l'effetto sul rendimento di intercettazione è evidente solo per particolato piuttosto grande ( $>0,6 \mu\text{m}$ ), mentre sul rendimento totale è più marcato per via dell'influenza che hanno anche gli altri meccanismi di cattura.

Si può notare comunque che l'effetto complessivo dovuto al grado di vuoto è meno significativo di quello portato dalla diminuzione del diametro delle particelle.

#### 7.3.4 Scelta dei parametri che ottimizzano la configurazione “atomizzazione con filtraggio a letto fisso” e stima dell’efficienza

I risultati derivanti dall’analisi effettuata sui termini del modello suggeriscono alcune soluzioni per la progettazione della nuova configurazione della torre di lavaggio.

1. Nebulizzazione le gocce devono essere piccole.

Poiché la dimensione delle gocce incide di più sul rendimento totale di cattura rispetto la velocità relativa, si può quindi mantenere la soluzione adottata con nebulizzatori che permettono di avere gocce di dimensioni di circa  $10\ \mu\text{m}$ , con una portata e un consumo minori di acqua e costi di gestione dell’impianto minori rispetto ai casi precedenti, inoltre i nebulizzatori conferiscono all’acqua una velocità piuttosto contenuta. Uno dei problemi che si potrebbero riscontrare usando gocce così piccole, potrebbe essere il loro trascinamento da parte dei fumi: nel caso sperimentale su cui vengono condotti i test, i gas hanno velocità molto basse (circa  $0,3\ \text{m/s}$ ) per cui questo rischio è meno risentito; nel caso di velocità più elevate questo aspetto va tenuto in considerazione e valutato.

Applicando il modello già descritto ai casi studiati si ottiene

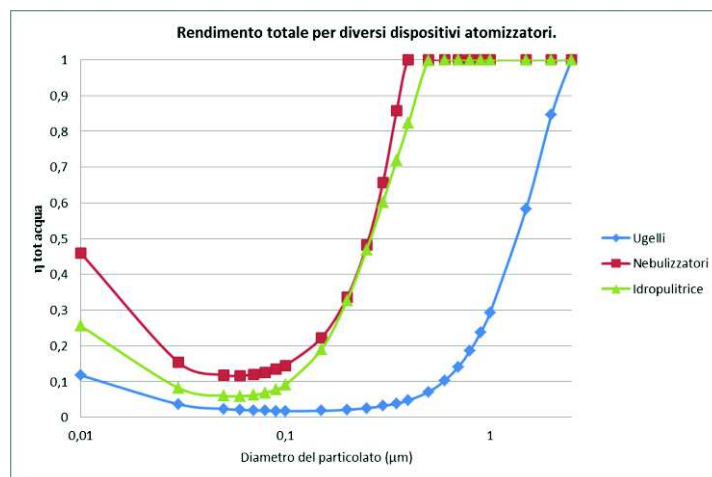


Figura 7.14 Andamento dei rendimenti dei tre meccanismi nel caso di cattura con acqua nelle tre configurazioni diverse: a) ugelli, b) effetto Venturi, c) nebulizzatori.

Configurazione	Portata acqua [kg/s]	Dimensione gocce [μm]	Velocità relativa [m/s]
Torre di lavaggio ad ugelli	0.196	150	12
Atomizzazione con effetto Venturi	0.117	40	75
Nebulizzazione	0.0067	15	7

**Tabella 7.6 Valori inseriti nel modello per confrontare le tre soluzioni**

Confrontando i tre casi si nota che, con gocce di 15 μm e velocità dell'acqua contenute (ottenute con i nebulizzatori), si riesce ad ottenere un rendimento globale di filtrazione da parte dell'acqua, uguale a quello dato dall'atomizzazione con effetto Venturi per dimensioni del particolato grandi e addirittura migliore sulle particelle di dimensioni piccole.

2. Per la zona del riempimento casuale si può sfruttare il grado di vuoto che va diminuito aumentando la **portata di acqua dai nebulizzatori**: infatti seppur limitato, questo parametro ha effetto sul rendimento.

3. I corpi di riempimento devono avere un **diametro** contenuto: già per 0,5 mm di diametro, i risultati migliorano notevolmente. Al momento sono stati fatti dei test con sfere di diametro 3mm il cui contributo è stato minimo.

4. Per quanto riguarda l'efficienza totale di cattura da parte delle particelle nel letto fluido, ad incidere è anche l'altezza del letto stesso e in particolare lo fa in maniera lineare. Allora all'aumentare dello strato di sfere, l'efficienza aumenta, ma crescono anche le perdite di carico e quindi i consumi.

Allora **l'altezza** è un parametro da ottimizzare, cercando il giusto compromesso tra elevato rendimento di cattura e basse cadute di pressione.

## 7.5 Valutazione delle perdite di carico e dei consumi energetici della torre

L'ultima fase della progettazione della torre di lavaggio è la valutazione delle perdite di carico, alle quali sono legati i consumi energetici dell'impianto di filtrazione. Infatti non è sufficiente che la torre abbia un'elevata efficienza di filtrazione, ma anche i consumi devono essere contenuti in relazione alle portate in gioco e all'applicazione del filtro stesso.

Proprio per questi motivi, la configurazione che sfrutta l'effetto venturi non è accettabile perché, pur avendo un'efficienza di filtrazione alquanto elevata (94 %), richiede un consumo energetico troppo elevato: la sola pompa ad alta pressione assorbe una potenza pari a 1,7 kW, che sommata a quella degli aspiratori e della ventola della caldaia arriva a 2,2 kW.

Si rende quindi necessario passare alla valutazione dei consumi energetici di questa nuova soluzione.

Il flusso di fumi passa attraverso il letto costituito da particelle solide e riempie lo spazio tra i corpi fino a che, quando la velocità del flusso diventa consistente, tale da imprimere una forza di galleggiamento che vince la forza peso del riempimento, il letto prima si espande e poi diventa completamente fluidizzato, ossia assume il comportamento tipico di un fluido.

Le perdite di carico in funzione della velocità del fluido hanno un andamento crescente fino al punto di minima fluidizzazione: infatti fino a questo punto il letto di corpi ha ancora il comportamento tipico dei solidi per cui le perdite variano con il quadrato della velocità del gas.

Durante la fluidizzazione le perdite prima continuano a crescere, ma meno velocemente, poi calano e diventano costanti, anche se i fumi continuano ad aumentare la loro velocità.

Allora le perdite di carico massime si hanno quando si ha fluidizzazione ossia quando la forza impressa dai fumi eguaglia la forza peso del letto costituito da corpi solidi (va considerata anche la forza di attrito tra fumi e solidi).

Dal bilancio delle forze ne deriva una perdita di carico pari a:

$$\Delta p = Z (1 - \varepsilon)(\rho_s - \rho_G)g$$

dove  $Z$  è l'altezza iniziale del letto;  $\varepsilon$  il grado di vuoto iniziale del letto;  $\rho_s$  la densità del solido;  $\rho_G$  la densità del gas e  $g$  l'accelerazione di gravità.

Allora nel caso della nuova configurazione della torre di lavaggio valutata, avendo come parametri quelli di Tabella 5.7, la perdita di carico è pari a:

Parametro	Valore numerico
$Z$	0,25 m
$E$	0,5
$\rho_s$	946 kg/m <sup>3</sup>
$\rho_G$	0,97 kg/m <sup>3</sup>

Tabella 7. 7 Valori dei parametri del letto fluidificato per il calcolo delle perdite di carico.

$$\Delta p = 0,25 * (1 - 0,5) * (946 - 0,97) * g \approx 1159 \text{ Pa}$$

Allora rispetto ad altri sistemi di filtrazione le perdite di carico sono piuttosto contenute; questa è una stima realizzata con un letto alto 25cm e con sfere da 0.5mm, nel caso da noi considerato si è realizzato un letto alto 10 cm con sfere da 3mm ottenendo delle perdite di carico pari a 600 Pa.

Queste perdite vengono vinte grazie al tiraggio dei fumi da parte degli aspiratori che richiedono quindi una potenza pari a 150W (3 aspiratori installati in serie del tipo attualmente usato nell'impianto sperimentale da 50 W l'uno).

#### *Effetto dell'altezza del letto su perdite di carico ed efficienza*

L'espressione dell'efficienza globale di cattura del particolato, tramite un riempimento di corpi sferici (equazione 5.35), mostra che il rendimento di cattura è direttamente proporzionale all'altezza del letto. Inserendo la granulometria però l'altezza agisce in maniera non direttamente proporzionale.

L'equazione (5.45) mostra linearità anche tra le perdite di carico e l'altezza del letto.

Quindi aumentare lo strato del riempimento Z, migliora la cattura del particolato, ma determina anche un aumento dei consumi energetici.

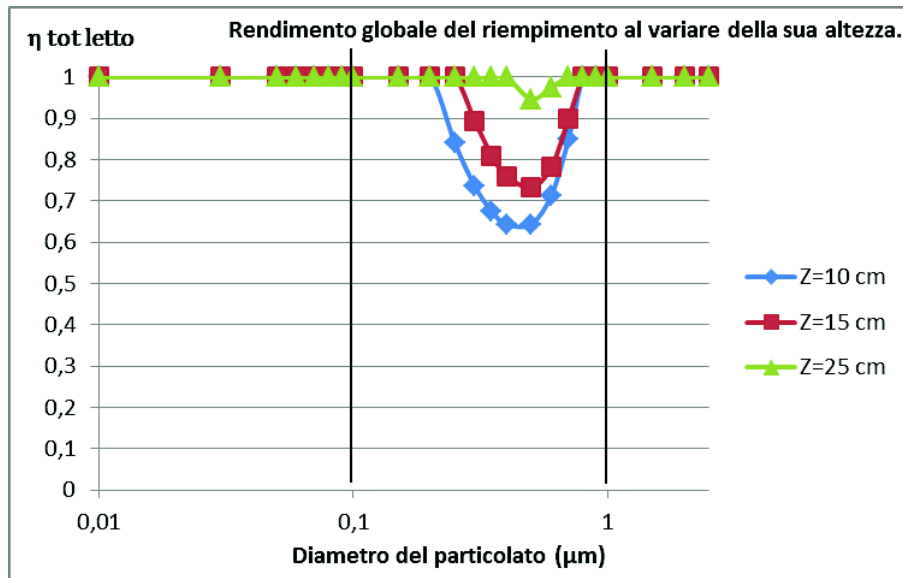


Figura 7.15 – Andamento del rendimento di filtrazione globale per la regione contenente lo strato di corpi sferici di diametro 0,5 mm in funzione del diametro del particolato, per diverse altezze del letto

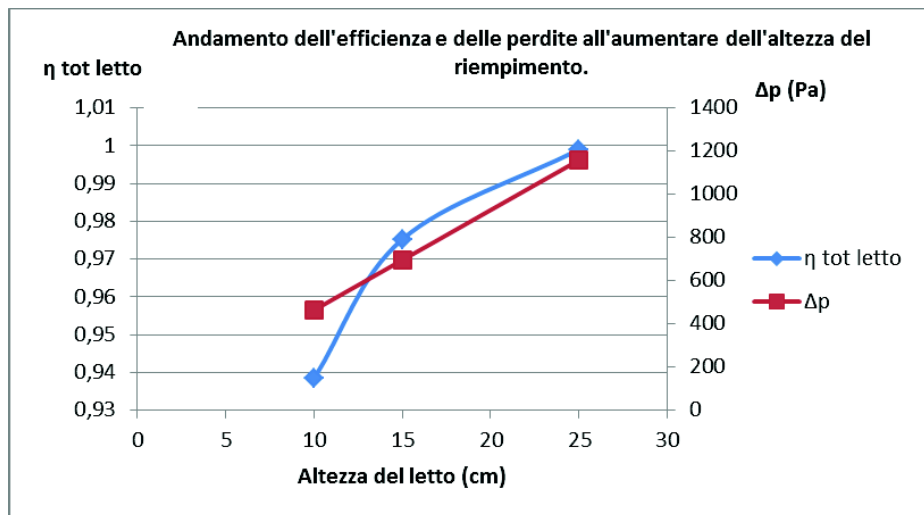


Figura 7.16 Andamento dell'efficienza di filtrazione e delle perdite di carico nel riempimento con corpi sferici al variare dell'altezza del letto.

Si può notare che in funzione dell'altezza del letto l'efficienza cresce più velocemente delle perdite di carico, anche se il suo andamento crescente tende ad attenuarsi per  $Z$  maggiori. Allora finché le perdite sono considerate accettabili conviene realizzare un letto alto così che l'efficienza sia maggiore, in quanto i fumi hanno un tempo di residenza nel letto elevato.

Effetto del grado di vuoto su perdite di carico ed efficienza

Anche il grado di vuoto è uno dei parametri che incide sia sull'efficienza, sia sulle perdite: in particolare quando questo cresce, ossia si lascia maggiore spazio per il passaggio dei fumi, sia l'efficienza che le perdite calano.

Anche in questo caso allora bisogna trovare il valore che rende accettabili tutte e due i parametri.

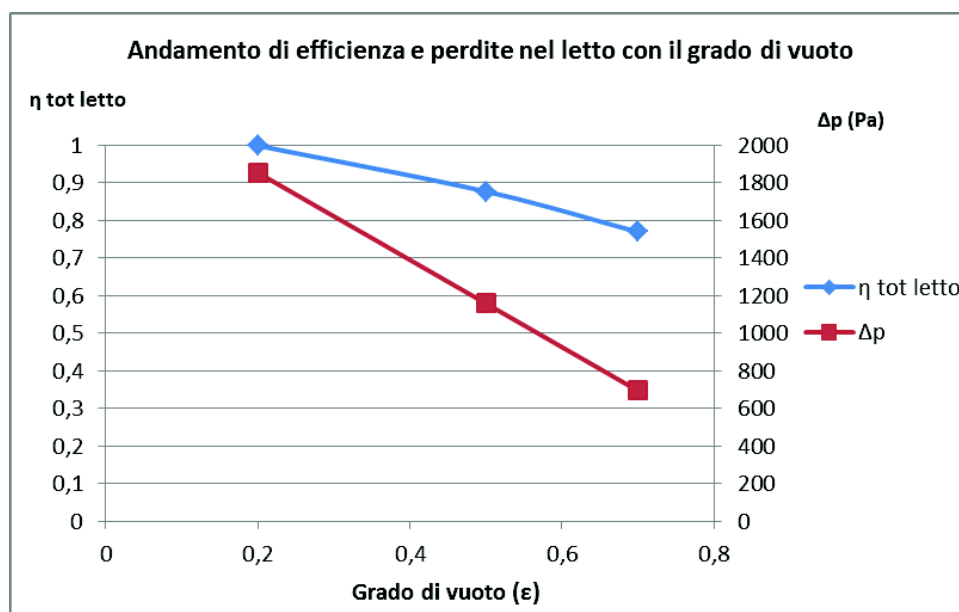


Figura 7.17 Andamento dell'efficienza di filtrazione e delle perdite di carico nel letto di sfere di diametro di 0,3 mm al variare del grado di vuoto.

In questo caso le perdite di carico crescono più velocemente dell'efficienza, al diminuire del grado di vuoto, quindi lasciare meno spazio a disposizione per il

passaggio dei fumi richiede un maggiore tiraggio da parte degli aspiratori, e quindi si ha una maggiore potenza assorbita, mentre l'aumento dell'efficienza è meno rilevante.

#### **Consumi energetici della pompa per l'acqua ai nebulizzatori**

Si è detto che per la parte che realizza la cattura del particolato con acqua, si utilizzano dei nebulizzatori in grado di fornire una spray in cui le gocce hanno una dimensione media dell'ordine dei 10  $\mu\text{m}$ . Non essendo ancora completati i test sulla configurazione per il momento si continuerà ad impegnare la pompa attuale che elabora fino a 0.75 l/min a 80bar assorbendo una potenza di 560W.

#### **Consumi energetici totali della nuova configurazione della torre.**

Considerando i consumi energetici legati agli aspiratori e alla pompa per l'acqua, la nuova configurazione della torre determina un consumo teorico pari a 700 W, riuscendo a garantire un'efficienza molto elevata, maggiore del 99,9%.

I risultati delle valutazioni fatte mostrano allora che la nuova configurazione migliora i parametri ottenuti con la pompa volumetrica adottata nel sistema Venturi sia in termine di rendimento che di riduzione notevole dei consumi energetici.

Questi risultati però derivano dall'applicazione di modelli matematici, per cui la nuova configurazione andrà testata sull'impianto per verificare la validità delle prestazioni ottenute. Solo dopo i test infatti sarà possibile determinare l'efficienza e i consumi effettivi.





## 8 Conclusioni

Nel corso del triennio del Dottorato l'attività è stata indirizzata alla progettazione di una soluzione impiantistica da applicare a caldaie di piccola taglia (inferiori ai 35 kWt) alimentate biomassa, già disponibili sul mercato, con lo scopo di abbattere l'emissione di polveri sottili (PM<sub>2.5</sub>) in uscita con i fumi di combustione, questo in virtù dell'aumentato utilizzo di biomassa come combustibile per la produzione di energia e per la combustione non industriale. I criteri principali consistono principalmente nel raggiungimento di un'efficienza di cattura maggiore del 99,9% ed in consumi energetici specifici minori di 10 Wh/Nm<sup>3</sup> (riconducibili a quelle ottenute a livello industriale), secondariamente nell'ottenere una soluzione facilmente installabile e dalla facile manutenzione.

Partendo dallo studio dei sistemi di filtrazione attualmente impiegati in ambito industriale si è individuato come tecnologia adatta agli scopi quella degli scrubber: realizzano la pulizia del flusso gassoso che li attraversa per mezzo di un fluido di lavaggio riuscendo così a mantenere contenute le perdite di carico e conseguentemente i consumi energetici.

Nel corso del Dottorato sono state allestite presso i laboratori del DIN di diverse configurazioni dell'impianto sperimentale che ha permesso di testare altrettante soluzioni impiantistiche valutando così l'efficacia di differenti metodologie di cattura delle polveri sottili.

L'analisi dei dati relativi alle soluzioni testate ha consentito l'individuazione dei parametri di progetto che influenzano l'efficienza di filtrazione: per ogni configurazione testata è stato possibile individuare gli aspetti positivi, da sviluppare ulteriormente, e gli aspetti limitanti, da eliminare o migliorare.

In particolare le grandezze influenti sono:

quantità di liquido iniettato;

- Dimensione del diametro aereodinamico del particolato  $D_p$ , così da determinare quale meccanismo di cattura è maggiormente efficace.  $D_p$  è compreso nel range  $0.1 \div 1 \mu\text{m}$ .

- velocità relativa tra fumi e liquido, è di scarsa importanza per le dimensioni di particolato trattate.
- grado di vuoto, deve essere limitato per aumentare la deviazione dei fumi e favorirne la turbolenza, anche se ad aumentare sono anche le perdite di carico;
- dimensione degli elementi filtranti  $D$  (intesi come corpi di riempimento o gocce). deve essere contenuta per aumentare la superficie di contatto tra fumi e liquido.

Dalla valutazione nei test condotti e applicando un modello matematico sviluppato dal team di ricerca è stato possibile configurare la prossima soluzione impiantistica combina:

- la nebulizzazione di gocce da  $10\mu\text{m}$  di una portata d'acqua ridotta ( $0.75\text{ l/min}$ )
- contributo di corpi di riempimento sferici del diametro  $D$  pari a  $0,5\text{mm}$ .

Dalle valutazioni effettuate questa soluzione promette di arrivare ad un'efficienza superiore del  $99.9\%$  con consumi elettrici specifici pari a  $15\text{ Wh/Nm}^3$ , ovvero un valore molto prossimo alle specifiche di progetto.

## *9 Linee di approfondimento e future attività di ricerca*

Il prossimo step consisterà nel testare la soluzione impiantistica consistente nell'atomizzazione di acqua in gocce da  $10\mu\text{m}$  in combinazione con la filtrazione di un letto fisso realizzato con corpi di riempimento sferici in polipropilene del diametro di 0.5mm.

Bisognerà valutare prima di tutto l'effetto della sola nebulizzazione a differenti portate della torre di lavaggio, dopodiché la valutazione dei soli corpi di riempimento variando l'altezza del letto fluido ed infine l'azione combinata dei due sistemi. Dai risultati ottenuti, ed implementandoli nel modello, sarà possibile capire su quale parametro è conveniente agire per massimizzare l'efficienza e minimizzare i consumi; concludendo in questa maniera la fase di progettazione del prototipo.

L'obiettivo seguente consisterà nell'industrializzazione del prototipo rispettando gli obiettivi originari del progetto in termini di facilità d'installazione e manutenzione; in questa fase sarà necessario procedere al dimensionamento dell'impianto di ricircolo dell'acqua di lavaggio prevedendo una cartuccia filtrante che periodicamente vada sostituita. Una volta terminata la versione industriale del sistema di filtrazione la versione stessa andrà testata.

L'attività di ricerca continuerà nella direzione di aumentare l'efficienza di filtrazione e di ridurre i costi di esercizio dell'impianto tramite l'uso tecnologie nanometriche all'interno della torre di lavaggio; inoltre si potrebbe sfruttare il contributo di sostanze chimiche che facilitino la miscelazione fra liquido e particolato diminuendo la tensione superficiale delle gocce d'acqua (tensioattivi), sempre tramite le sostanze additive si può indirizzare la ricerca all'abbattimento di altri inquinanti presenti nei fumi.



## 10 Nomenclatura

$a$	raggio dell'elemento filtrante [m]	$F_i$	forza dovuta all'i-simo meccanismo [N]
$A_C$	sezione della torre [m <sup>2</sup> ]	$F_n$	forza normale [N]
$A_p$	superficie della particella [m <sup>2</sup> ]	$F_P$	forza peso [N]
$C$	concentrazione di particolato in massa [mg/Nm <sup>3</sup> ]	$F_t$	forza tangenziale [N]
$C_C$	fattore di scivolamento o di Cunningham	$g$	accelerazione gravitazionale [m/s <sup>2</sup> ]
$C_D$	coefficiente di trascinamento	$G$	parametro di sedimentazione
$D$	diametro dell'elemento filtrante [m]	$J$	coefficiente idrodinamico
$D_{32}$	diametro di Sauter [m]	$K$	coefficiente idrodinamico
$d$	diametro dell'ugello [m]	$Kn$	numero di Knudsen
$\mathcal{D}$	coefficiente di diffusione [m <sup>2</sup> /s]	$L$	flusso di acqua [kg/ m <sup>2</sup> s]
$D_p$	diametro aerodinamico della particella [m] o [μm]	$M$	peso molecolare [kg/mol]
$F_A$	spinta di Archimede [N]	$\dot{m}_L$	portata di liquido [kg/s]
$F_D$	forza di trascinamento [N]	$m_p$	massa della particella [kg]
$F_D'$	forza di trascinamento corretta dal fattore di scivolamento [N]	$N$	concentrazione delle particelle in numero
$F_{ei}$	forza esterna i-sima [N]	$N_S$	numero di corpi di riempimento
		$p$	pressione [Pa]
		$Pe$	numero di Peclet
		Peso filtro	peso del filtro di campionamento [mg]
		$r$	coordinata radiale
		$R$	parametro di intercettazione

R	costante universale dei gas [J/mol K]	$U_r$	velocità relativa tra gas e liquido [m/s]
Re	numero di Reynolds	$U_{wt}$	velocità terminale della goccia [m/s]
$S_n$	sezione dell'ugello [m <sup>2</sup> ]	$\mathbf{v}$	vettore di velocità della particella [m/s]
St	numero di Stokes	V	volume campionato di fumi [Nm <sup>3</sup> ]
t	tempo [s]	$v_L$	velocità del liquido [m/s]
T	temperatura assoluta [K]	Z	altezza del riempimento [m] o [cm]
$\bar{u}$	vettore di velocità dei fumi [m/s]	$\Delta p$	perdite di carico [Pa]
$u_{x,y,z}, u_{r,\theta}$	componenti di velocità dei fumi, cartesiane e polari [m/s]	$\langle x(t)^2 \rangle$	spostamento quadratico medio [m <sup>2</sup> ]
$u_\infty, U_\infty$	velocità indisturbata dei fumi [m/s]	%O <sub>2</sub>	percentuale di ossigeno nei fumi
U	velocità superficiale dei fumi nella direzione principale del flusso [m/s]		

#### Lettere greche

$\alpha$	grado di pieno	$\eta_i$	efficienza dell'i-simo meccanismo
$\alpha(t)$	accelerazione casuale [m/s <sup>2</sup> ]	$\theta$	coordinata tangenziale
$\gamma$	parametro di approssimazione	k	costante di Boltzmann [J/K]
$\varepsilon$	grado di vuoto	$\lambda$	cammino libero medio [m] o [ $\mu$ m]
$\eta$	efficienza di filtrazione ottenuta sperimentalmente	$\mu$	viscosità dinamica [Pa s]
		$\mu'$	coefficiente di viscosità [Pa s]
		$\xi$	sfericità

$\rho$	densità [kg/m <sup>3</sup> ]	$\tau$	tempo di rilassamento
$\sigma$	rapporto tra viscosità di liquido e gas		della particella [s]
$\sigma_L$	tensione superficiale del liquido [N/m]	$\Psi$	linea di corrente

### Pedici

D, diff	diffusione
eff	effettiva
G	gas
L	liquido
p	particella
R, int	intercettazione
S	solido, dei corpi di riempimento
s	superficiale
St, imp	impatto
tot acqua	relativo alla regione di cattura con gocce di acqua
tot letto	relativo alla regione di cattura con corpi di riempimento





## 11 Appendice

### Bilancio delle forze e forza di trascinamento su una singola particella

Per analizzare il comportamento dinamico di una particella sospesa in un fluido, il primo aspetto da considerare è la forza di trascinamento. Questa forza è sempre presente quando una particella si muove all'interno di un campo in cui c'è un materiale e non il vuoto.

Per calcolare la forza di trascinamento si valuta l'equazione del moto di un fluido su un corpo considerando la sua velocità e il campo di pressione. La particella viene considerata sferica: nel caso del particolato presente nei fumi di combustione, questa è un'approssimazione piuttosto forte, ma viene comunque adottata per semplificare la trattazione. In particolare detto  $\bar{u}$  il vettore velocità del fluido, considerato incompressibile (seconda approssimazione), le equazioni in gioco sono [19]:

- equazione di continuità: indica che la massa all'interno di un dominio si conserva (se non si è in presenza di disaggregamento nucleare). Considerando il fluido incompressibile, la densità si conserva, per cui l'equazione si riduce a:

$$\text{div } \bar{u} = 0$$

ossia il volume del fluido in movimento si conserva:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0;$$

- equazione di Navier-Stokes: è l'equazione del moto che deriva dall'equazione fondamentale della dinamica ( $\bar{F} = m\bar{a}$ ) che considera come forze in gioco le forze specifiche di massa  $\bar{f}$  (dipendono dal sistema di riferimento: se è fisso includono solo la forza di gravità, se è mobile va considerata anche la forza di Coriolis) e quelle specifiche di superficie  $\bar{\tau}$  scomponibili in due componenti, una normale alla superficie, ossia la pressione, e una parallela, ossia la tensione tangenziale.

Per i fluidi reali la forma di questa equazione è:

$$\rho \bar{f} - \text{grad } p + (\mu + \mu') \text{grad div } \bar{u} + \mu \nabla^2 \bar{u} = \rho \frac{D\bar{u}}{Dt}$$

Per i fluidi incomprimibili il terzo termine scompare perché vale  $\text{div } \bar{u} = 0$  e anche il coefficiente di viscosità  $\mu'$  legato alla variazione di volume, inoltre considerando un sistema di riferimento fisso, la forza di massa è la gravità ( $\bar{f} = \bar{g}$ ).

In queste condizioni si esplicita l'equazione del moto per la componente di velocità diretta lungo l'asse x:

$$\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) = \rho \left( \frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \right)$$

con  $u_x$ ,  $u_y$  e  $u_z$  componenti di velocità del vettore  $\bar{u}$  del fluido,  $p$  pressione,  $\mu$  e  $\rho$  viscosità e densità del fluido e  $g_x$  componente della forza di gravità in direzione x.

[17] Risolvendo le due equazioni si vuole determinare il campo di forze che il fluido esercita sulla particella in direzione del flusso, che come si è detto in precedenza, è formato da una forza normale  $F_n$  alla superficie e da una tangenziale  $F_t$ .

Integrando le forze specifiche considerando una geometria sferica (per la particella sospesa) si ottengono queste due forze:

$$F_n = \pi \mu D_p u_\infty$$

$$F_t = 2\pi \mu D_p u_\infty$$

dove  $u_\infty$  è la velocità indisturbata del flusso e  $D_p$  il diametro della particella.

Queste sono le forze che il fluido esercita su una sfera ferma, ma possono essere viste anche come le forze che una particella in moto compie sul fluido in cui si muove.

Tra le forze che agiscono si considera poi anche la spinta di Archimede che è la forza peso che avrebbe il fluido se occupasse il volume della particella:

$$F_A = \frac{4}{3} \pi \left( \frac{D_p}{2} \right)^3 \rho g$$

Infine va considerata la forza peso della particella stessa:

$$F_p = \frac{4}{3} \pi \left( \frac{D_p}{2} \right)^3 \rho_p g$$

con  $\rho_p$  densità della particella.

Dalla somma delle quattro forze in gioco deriva la forza di trascinamento che il fluido deve esercitare sulla particella per tenerla sospesa e trascinarla lungo le sue traiettorie.

Si preferisce dare alla forza di trascinamento una forma che la esprima come frazione dell'energia cinetica, attraverso il coefficiente di trascinamento  $C_D$ :

$$F_n + F_t + F_A + F_p = F_D = C_D A_p \rho \frac{u_\infty^2}{2} \xrightarrow[\substack{\text{per una sfera} \\ A_p = \frac{\pi}{4} D_p^2}]{\hspace{1cm}} C_D \frac{\pi}{4} D_p^2 \rho \frac{u_\infty^2}{2}$$

Il coefficiente di trascinamento  $C_D$  dipende dal numero di Reynolds:

$$Re = \frac{u_\infty D_p \rho}{\mu}$$

che rappresenta il rapporto tra la forza di inerzia, a numeratore, e quella viscosa, a denominatore.

In particolare a seconda del valore che esso assume, il coefficiente  $C_D$  cambia:

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} & Re < 0.1 \\ \frac{24}{Re} \left( 1 + \frac{3}{16} Re + \frac{9}{160} Re^2 \ln(2Re) \right) & 0.1 < Re < 2 \\ \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}) & 2 < Re < 500 \\ 0.44 & 500 < Re < 2 \cdot 10^5 \end{cases}$$

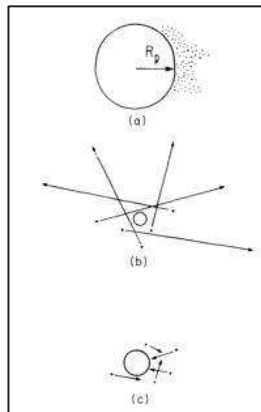
## Il numero di Knudsen

Le particelle che costituiscono l'aerosol sono piccole: a seconda che il loro diametro sia comparabile o meno alla distanza tra le molecole del gas in cui si trovano, il comportamento dello stesso aerosol è diverso perché cambia l'interazione tra fluido e particelle.

Per definire la natura dell'aerosol si usa il numero di Knudsen:

$$Kn = \frac{\lambda}{D_p/2}$$

dove  $\lambda$  è il cammino libero medio, ossia la distanza media che intercorre tra due urti consecutivi della particella con le molecole del gas, mentre a denominatore compare il raggio della particella.



**Figura A.53** Numero di Knudsen ( $Kn = \lambda/(D_p/2)$ ) e i tre regimi di comportamento dell'aerosol: a) regime continuo ( $Kn \ll 1$ ), b) regime cinetico ( $Kn \gg 1$ ), c) regime di transizione ( $Kn \approx 1$ ). Fonte: [17].

- a)** Se il raggio della particella è grande rispetto il cammino libero ( $Kn \ll 1$ ) si può considerare un regime continuo per il quale valgono le equazioni dette.
- b)** Se invece il cammino libero è molto grande rispetto al raggio delle particelle ( $Kn \gg 1$ ), la singola particella risulta circondata da molecole e si parla di regime cinetico.
- c)** Se cammino libero e raggio della particella sono comparabili, si cade nel regime di transizione.

Il cammino libero medio di un gas si può calcolare dalla teoria cinetica dei gas:

$$\lambda = \frac{\mu}{0.449 p \left( \frac{8 M}{\pi R T} \right)^{1/2}}$$

con  $p$  pressione del gas,  $M$  peso molecolare,  $\mu$  viscosità dinamica,  $T$  temperatura e  $R$  costante universale dei gas.

Nel caso di aria a 25°C e pressione atmosferica ( $\mu = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) vale:

$$\lambda = 6,51 \cdot 10^{-8} \text{ (m)} = 0,0651 \text{ (}\mu\text{m)}.$$

### Fattore correttivo di scivolamento

Le equazioni che si sono descritte in precedenza valgono quando il regime è continuo, ossia quando il diametro della particella eccede di molto il cammino libero delle molecole del gas ( $Kn \ll 1$ ).

Quando invece il raggio della particella è comparabile o più piccolo rispetto il cammino medio, la forza di trascinamento esercitata dal fluido sulla particella è minore di quella valutata in precedenza (dalla legge di Stokes), per cui questa forza viene decurtata di un fattore di correzione  $C_c$ :

$$F'_D = \frac{F_D}{C_c}$$

Al fattore di correzione si può dare la forma generale:

$$C_c = 1 + Kn \left[ 1,257 + 0,40 e^{\left(\frac{-1,10}{Kn}\right)} \right].$$

Oppure si può usare un valore diverso a seconda della dimensione della particella:

$$C_c = \begin{cases} 1 + 1,257 \frac{2\lambda}{D_p} & \text{se } D_p \gg \lambda \\ 1 + 1,657 \frac{2\lambda}{D_p} & \text{se } D_p \ll \lambda \end{cases}$$

### Moto di una particella in un campo di forze esterne

Il moto di una particella in primo luogo è dato dal fatto che su di essa agiscono una serie di forze esterne (per esempio gravità o campo elettrico). Tra queste agisce anche la forza di trascinamento esercitata dal fluido, che cresce fino a che è presente una differenza tra la velocità della particella e quella del fluido.

Per progettare un dispositivo di filtrazione delle particelle, è necessario descrivere il moto delle particelle che sono soggette a forze esterne. Per valutare il comportamento della particella immersa in un campo di forze, si esprime il bilancio delle forze su una particella di massa  $m_p$ :

$$m_p \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \sum_i \mathbf{F}_i$$

dove  $\mathbf{v}$  è il vettore velocità della particella e  $\mathbf{F}_i$  è la forza che agisce sulla particella secondo il meccanismo  $i$ -esimo.

Visto che, quando la particella non si muove nel vuoto, la forza di trascinamento è sempre presente, si può esplicitare:

$$m_p \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{3\pi\mu D_p}{C_c} (\mathbf{u} - \mathbf{v}) + \sum_i \mathbf{F}_{ei}$$

dove  $\mathbf{u}$  è il vettore di velocità del gas e  $\mathbf{F}_{ei}$  rappresenta una delle forze esterne agenti.

Si noti che la forza di trascinamento esplicitata considera solo la somma della forza di pressione e della forza tangenziale, mentre spinta di Archimede e forza di gravità vengono considerate come forze esterne e quindi rientrano nella sommatoria presente a secondo membro. La forza di trascinamento è presente fino a quando gas e particella hanno una velocità relativa non nulla.

L'espressione del bilancio di forze così scritta, risulta approssimata perché non tiene in considerazione il gradiente di pressione dato dall'accelerazione della particella nel fluido, la forza legata all'accelerazione apparente della massa e della forza crescente dovuta alla deviazione della velocità del fluido rispetto le condizioni di flusso stazionario, termini che nelle applicazioni di interesse possono comunque essere trascurati.

Nel caso in cui l'unica forza esterna ad agire sia la forza di gravità, il bilancio diventa:

$$m_p \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{3\pi\mu D_p}{C_c} (\mathbf{u} - \mathbf{v}) + m_p \mathbf{g}$$

e dividendo tutto per  $\frac{3\pi\mu D_p}{C_c}$  si ottiene:

$$\tau \frac{dv}{dt} + v = u + \tau g$$

con

$$\tau = \frac{m_p}{\frac{3\pi\mu D_p}{C_c}} \xrightarrow[\text{per una sfera}]{m_p = \frac{\pi}{6}\rho_p D_p^3} \tau = \frac{\rho_p D_p^2 C_c}{18 \mu}$$

che è un tempo caratteristico associato al moto della particella, detto tempo di rilassamento che indica quanto velocemente una particella raggiunge la velocità del flusso (annullando la forza di trascinamento) [18]. Più la particella è piccola e più è basso il tempo di rilassamento e quindi ciò significa che essa impiega poco tempo per superare il transitorio in cui particella e fluido hanno diverse velocità: superato il tempo di rilassamento, la particella viene trascinata completamente dal flusso e con la sua stessa velocità.

### Dimostrazione equazione di Langevin

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\tau} v + \alpha(t)$$

Considerando il moto di una particella in un campo bidimensionale x-y (prendendo l'asse y rivolto verso l'alto), sotto l'azione della sola forza di gravità, l'equazione di bilancio scomposta nelle due componenti risulta:

$$\tau \frac{dv_x}{dt} + v_x = u_x$$

$$\tau \frac{dv_y}{dt} + v_y = u_y - \tau g$$

Poiché le componenti di velocità sono date da:



$$v_x = \frac{dx}{dt}$$

$$v_y = \frac{dy}{dt}$$

le equazioni possono essere riscritte in funzione della posizione della particella,  $x(t)$  e  $y(t)$ :

$$\tau \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} = u_x$$

$$\tau \frac{d^2y}{dt^2} + \frac{dy}{dt} = u_y - \tau g$$

Integrando le equazioni una volta si ottengono le componenti di velocità della particella nel tempo; integrando una seconda volta si ottiene l'andamento della traiettoria della particella per cui in ogni istante si può determinare la sua posizione.

Per determinare la soluzione è necessario conoscere il campo del moto del fluido e quindi  $\mathbf{u}$  e le condizioni iniziali di posizione e velocità della particella.

Infatti l'accelerazione casuale  $\alpha(t)$  è un termine discontinuo e rappresenta le forze esercitate dalle molecole del flusso che impartiscono un moto irregolare e a scatti alle particelle.

Poiché le traiettorie della particella sono casuali, per studiare i moti browniani è necessario considerare il comportamento di un'intera popolazione di particelle: queste saranno caratterizzate allora da uno spostamento medio nelle tre dimensioni ( $\langle x(t) \rangle$ ,  $\langle y(t) \rangle$ ,  $\langle z(t) \rangle$ ), che sarà però nullo in quanto l'accelerazione  $\alpha(t)$  non ha direzioni preferenziali. Invece lo spostamento quadratico medio non è nullo e permette di quantificare l'intensità dei moti browniani:

$$\langle x(t)^2 \rangle = \langle y(t)^2 \rangle = \langle z(t)^2 \rangle = \frac{2kT C_c t}{3\pi\mu D_p}$$

[27] L'uguaglianza fu determinata per la prima volta da Einstein (1905) e confermata successivamente da numerosi studi sperimentali.

Gli spostamenti delle particelle dovuti ai moti browniani possono essere descritti come un processo di diffusione, descritto appunto dall'equazione della diffusione:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \mathcal{D} \nabla^2 N$$

dove  $N$  è la concentrazione delle particelle e  $\mathcal{D}$  il coefficiente di diffusione.

[28] [29] Poiché la diffusività  $\mathcal{D}$  è legata allo spostamento quadratico medio delle particelle come:

$$\langle x(t)^2 \rangle = \langle y(t)^2 \rangle = \langle z(t)^2 \rangle = 2\mathcal{D}t$$

l'equazione della diffusione diventa:

$$u_r \frac{\partial N}{\partial r} + u_\theta \frac{\partial N}{r \partial \theta} = \mathcal{D} \left[ \frac{\partial^2 N}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial N}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial N}{\partial \theta} \right) \right]$$

Avendo l'espressione delle linee di corrente di Kuwabara, si possono introdurre nell'equazione le componenti di velocità e risolvere l'equazione.

Una volta determinato l'andamento della concentrazione delle particelle nel flusso si può ottenere l'efficienza per diffusione come rapporto tra la frazione di particelle che diffondono sulla superficie della goccia e la proiezione trasversale della goccia stessa:

$$\eta_{diff} = \frac{2\pi\mathcal{D} a^2 \int_0^\pi \left( \frac{\partial N}{\partial r} \right)_{r=a} \sin \theta d\theta}{u N_0 \pi a^2}$$

dove  $N$  è la concentrazione delle particelle,  $N_0$  è la concentrazione delle particelle in una regione sufficientemente lontana dalla goccia,  $a$  è il raggio della goccia ( $a = D/2$ ) e  $\mathcal{D}$  il coefficiente di diffusione.

[28] Risolvere l'equazione di diffusione per via analitica è tutt'altro che semplice, per cui si usa spesso un metodo approssimato basato sulla teoria dello strato limite, applicato per ricavare la frazione di particelle trasferite per diffusione sulla superficie dell'elemento filtrante. Secondo questo metodo si assume che esiste uno strato limite di diffusione che separa la zona più esterna in

cui la concentrazione delle particelle è  $N_0$ , dalla zona interna allo strato in cui la concentrazione risulta decrescente e passa dal valore  $N_0$  in corrispondenza del limite, al valore nullo in corrispondenza della superficie filtrante della goccia.

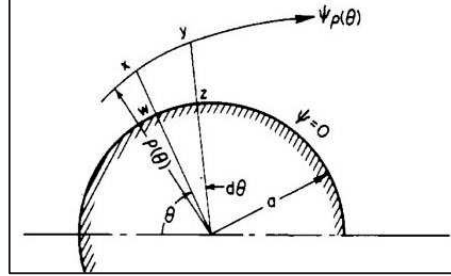


Figura A.2 Diagramma schematico dello strato limite di diffusione attorno ad una sfera. Fonte: [28].

Si considera allora un volume di controllo compreso tra la superficie della goccia e lo strato limite di diffusione  $\Psi_\rho$  (w-x-y-z-w di Figura A.2) e si assume che, all'interno dello strato, la diffusione in direzione circonferenziale (in direzione di  $\theta$ ) sia trascurabile rispetto quella in direzione radiale (lungo  $r$ ). Si può scrivere allora l'equazione di bilancio della concentrazione per il volume di controllo:

$$d \left[ - \int_0^{2\pi\Psi_\rho} N(\Psi, \theta) d\Psi + N_0 2\pi\Psi_\rho \right] = -2\pi D \left( \frac{\partial N}{\partial r} \right)_{r=a} a^2 \sin \theta d\theta$$

dove  $\Psi_\rho$  è la linea di corrente che individua il bordo dello strato limite. A primo membro vi è la differenza tra ciò che entra e ciò che esce dal volume di controllo in direzione circonferenziale, in termini di concentrazione, mentre a secondo membro c'è la quantità di particelle che viene trasferita per diffusione sulla superficie della goccia.

Integrando per parti si ottiene:

$$d \int_0^{N_0} \Psi dN = -Da^2 \left( \frac{\partial N}{\partial r} \right)_{r=a} \sin \theta d\theta$$

A questo punto, avendo l'espressione della linea di corrente e facendo tutti i passaggi, si possono ricavare tutti i termini che servono per il calcolo dell'efficienza  $\eta_D$ .



## Efficienza di cattura del particolato con corpi di riempimento sferici

Anche con questo meccanismo, la cattura del particolato avviene grazie all'acqua; in questo caso crea un film sulle sfere che costituiscono il riempimento, ma sono le caratteristiche del letto fluidificato e dei corpi di riempimento a determinare la superficie di contatto tra fumi e liquido, l'accelerazione ed il cambiamento continuo di direzione del gas ed a generare maggiore turbolenza.

Per la valutazione del rendimento di filtrazione nel caso di riempimento casuale si è utilizzato il modello di Lee [23]. Anche in questo caso si parte dalla determinazione dell'efficienza data dalla singola particella che costituisce il letto, considerando un volume di controllo che contiene la particella lambita dal flusso di fumi e determinando l'effetto di ogni meccanismo di cattura.

Partendo da considerazioni simili, le efficienze dei diversi meccanismi dipendono dagli stessi parametri che sono stati introdotti per la cattura mediante intercettazione, impatto e diffusione, ovvero le gocce di acqua ( $Pe$ ,  $R$  e  $St$ ): a cambiare, oltre ai valori delle grandezze in gioco, è l'elemento filtrante ovvero una sfera ricoperta da un film liquido.

In particolare poi cambia il campo di moto: la singola sfera fa parte di un letto di corpi di riempimento che determinano una diversa espressione delle linee di corrente del flusso di fumi. Per descrivere il campo di moto si utilizzano le linee di corrente derivate anche per questa situazione da [28]:

$$\psi = \frac{u_{\infty} a^2}{K} \left( \frac{1}{4} \left( 1 - \frac{2}{5} \alpha \right) \frac{a}{r} - \frac{3r}{4a} + \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{2} \alpha \right) \frac{r^2}{a^2} - \frac{3}{20} \alpha \frac{r^4}{a^4} \right) \sin^2 \theta$$

Per semplificare le analisi successive si utilizza una forma più compatta per la linea di corrente che risulta affetta da errore, che però può essere trascurato. Vale:

$$\psi = \frac{u_{\infty} a^2}{K} \frac{3(1 - \alpha)}{4} \frac{\left( \frac{r}{a} - 1 \right)^2}{\left( \frac{r}{a} \right)^{\gamma}} \sin^2 \theta$$

con  $r$  e  $\theta$  coordinate radiale e circonferenziale rispettivamente;  $u_{\infty}$  velocità indisturbata dei fumi, quando sono sufficientemente lontano dalla sfera;  $a$  raggio della sfera ( $a = D/2$ );  $\alpha$  grado di pieno,

ossia frazione del volume della torre occupato dai corpi di riempimento;  $K$  è il parametro idrodinamico che tiene conto dell'influenza delle sfere poste in vicinanza di quella considerata ed è pari

$K = 1 - \frac{9}{5}\alpha^{\frac{1}{3}} + \alpha - \frac{1}{5}\alpha^2$  ed infine  $\gamma$  è un parametro di approssimazione per semplificare la forma delle linee di corrente ed è  $\gamma = \frac{1+2\alpha}{3-3\alpha}$ .

Si analizzano anche in questo caso i diversi rendimenti di filtrazione e i rispettivi termini, con cui andare a determinare successivamente l'efficienza complessiva del letto di sfere.

### Efficienza di cattura con corpi di riempimento sferici per diffusione

Secondo il modello matematico di Lee, il rendimento per diffusione, applicando il metodo basato sulla teoria dello strato limite (capitolo 2), è dato da:

$$\eta_D = 3.5 \left( \frac{1-\alpha}{K} \right)^{1/3} Pe^{-2/3}$$

I parametri da cui dipende sono:

**Pe:** numero di Peclet (con un diverso esponente rispetto al caso di cattura con gocce di acqua).

Per questa grandezza le analisi svolte per le gocce di acqua sono ancora valide: per favorire la diffusione il numero di Peclet deve essere basso, così che abbia più effetto il trasporto di massa diffusivo rispetto a quello convettivo e ciò accade se i fumi hanno bassa velocità ( $U$ ), se la sfera ha un diametro ridotto ( $D$ ) e se è alto il coefficiente di diffusione ( $\mathcal{D}$ ), ossia se la temperatura ( $T$ ) è alta o la viscosità dei fumi ( $\mu$ ) è bassa.

**$\alpha$ .** In questo caso il grado di pieno, la frazione di volume occupata dalle sfere  $\alpha$ , dipende dalla loro forma o dimensione: se si fissa l'altezza del letto  $\alpha$  è un parametro derivato dalle altre grandezze di tipo geometrico, oppure si può impostare proprio  $\alpha$  e quindi è l'altezza del letto ad essere derivata.

[17] Se si ha il numero di sfere (di diametro  $D$ ) per unità di volume nel letto  $N_S$ , il grado di pieno è dato da:

$$\alpha = \frac{\pi}{6} D^3 N_S.$$

Nella pratica si può arrivare a valori anche di  $\alpha$  uguali a 0,7. Nel caso analizzato invece  $\alpha$  si è fissato a 0,5 (il volume del letto è per metà riempito di particelle e per metà lasciato libero per l'acqua e i fumi) e poi regolato con la portata di acqua.

Se la frazione occupata dalle sfere aumenta l'efficienza per diffusione migliora.

**K.** Il parametro K è lo stesso coefficiente idrodinamico che dipende dal grado di vuoto ed è dato da:

$$K = 1 - \frac{9}{5}\alpha^{\frac{1}{3}} + \alpha - \frac{1}{5}\alpha^2$$

Al variare di  $\alpha$  tra 0 e 1, il suo valore cala da 1 a 0: infatti esso è legato alla mobilità dei fluidi in relazione all'influenza che le sfere vicine esercitano.

Si fa notare che nell'espressione del rendimento per diffusione non compare il termine  $\gamma$  che semplifica l'espressione delle linee di corrente: in realtà anche questo entra in gioco quando si inserisce  $\Psi$  nell'equazione di diffusione (si rimanda sempre al capitolo 4 per tutti i passaggi). In questa valutazione, solo per il meccanismo di diffusione, il modello di Lee pone  $\gamma$  uguale a 2 ( $\gamma = 2$ ), valore ottenuto se fosse  $\alpha = 5/8$ , perché con queste quantità così fissate, l'espressione originale delle linee di corrente e quella approssimata sono praticamente uguali (l'errore è molto contenuto).

#### Efficienza di cattura con corpi di riempimento sferici per intercettazione

L'efficienza di filtrazione per intercettazione da parte di un corpo sferico è data da:

$$\eta_R = 1.5 \frac{1 - \alpha}{K} \frac{R^2}{(1 + R)^\gamma}$$

I parametri influenti e le considerazioni sono analoghi al caso di cattura con le gocce.

**R.** Il parametro di intercettazione che deve essere alto, per cui le sfere devono avere un diametro piccolo (**D**) così che le traiettorie intercettabili aumentino. In particolare al diminuire della dimensione delle sfere D, si può notare che l'intercettazione inizia ad avere effetto su dimensioni del particola  $D_p$  minori: per cui diminuendo D, la curva di efficienza per intercettazione mantiene il suo andamento, ma viene traslata a sinistra verso diametri  $D_p$  inferiori.

**$\alpha$ .** Quando la parte di volume del letto occupata dalle particelle cresce ( $\alpha$  alto),  $\eta_R$  aumenta perché avendo più sfere si hanno più traiettorie sulle quali può avvenire intercettazione.

Dal grado di pieno dipendono anche i parametri  $K$  e  $\gamma$  (che per questo meccanismo viene considerato), che, una volta impostato  $\alpha$ , sono univocamente definiti.

Più precisamente, come già detto,  $K$  tiene conto degli effetti di vicinanza delle altre sfere nel letto, invece l'esponente  $\gamma$  determina la forma dell'andamento della curva del rendimento di intercettazione. Infatti se  $\gamma$  ha un valore vicino a 2 l'andamento di  $\eta_R$  con il diametro del particolato  $D_p$  è circa lineare.

#### Efficienza di cattura con corpi di riempimento sferici per impatto

Per l'impatto vale:

$$\eta_{St} = \left( \frac{St}{St + 0.25} \right)^2$$

Il numero di Stokes ha la stessa espressione sia per le gocce che per le sfere:

$$St = \frac{\rho_p D_p^2 U_r}{18 \mu D}.$$

A cambiare sono i valori di  $D$ , in questo caso riferito al diametro della sfera, e della velocità relativa  $U_r$  che è determinata dalla differenza tra il film fluido di acqua sulle sfere, che scorre verso il basso, e i fumi, ma questa grandezza si può prendere praticamente pari alla velocità dei fumi perché il liquido si muove molto lentamente ( $U_r \approx U$ ).

Anche in questo caso più è grande il numero di Stokes e più è favorito il fenomeno dell'impatto, quindi i fumi devono essere veloci ( $U$ ) e poco viscosi ( $\mu$ ) e le sfere devono essere piccole ( $D$ ).

#### Efficienza di cattura con corpi di riempimento sferici per gravità



Il modello di Lee tiene conto anche del meccanismo di cattura dovuto alla gravità: il particolato, se di grande dimensione  $D_p$ , non riesce a seguire i fumi perché cade per via del proprio peso. La cattura che deriva da questo meccanismo è molto contenuta e l'effetto si ha solo su diametri di particolato piuttosto grandi, per cui è trascurabile per la granulometria del particolato derivante dalla combustione di biomassa.

Vale:

$$\eta_G = \frac{G}{1 + G}$$

$$G = \frac{\rho_p g D_p^2 C_C}{18 \mu U}$$

dove  $G$  è detto parametro di sedimentazione e dipende da:  $\rho_p$  densità del particolato;  $g$  accelerazione di gravità;  $\mu$  viscosità dei fumi;  $D_p$  diametro del particolato;  $C_C$  fattore di Cunningham e  $U$  velocità dei fumi.

Le grandezze  $\rho_p$  e  $D_p$  sono indicative della massa, per cui se aumentano, la forza di gravità agisce in modo più significativo, facilitando la deposizione del particolato.

Se la velocità  $U$  del flusso è bassa, il particolato viene trascinato meno dai fumi e ricade facilmente sotto l'azione del suo peso ( $G$  cresce).

Infine la forza di gravità agisce maggiormente se i fumi sono poco viscosi ( $\mu$  bassa) perché questi non danno molta resistenza al moto del particolato per gravità.

Poiché per le condizioni operative e la granulometria del particolato che si hanno nel caso sperimentale considerato, l'effetto di questo meccanismo è praticamente nullo su ogni valore di  $D_p$ , la gravità non sarà considerata nei passaggi successivi, ma qualora una diversa situazione richiedesse di considerarla è semplice e veloce aggiungerla.

Efficienza di cattura complessiva con corpi di riempimento sferici

I meccanismi descritti sono quelli che intervengono per la cattura del particolato in una torre di lavaggio che presenta un riempimento casuale di corpi sferici: in particolare quelle valutate sono le efficienze di una singola sfera nel letto.

Allora l'efficienza complessiva della singola sfera  $\eta$  è la somma di tutti i termini presi in considerazione:

$$\eta = \eta_D + \eta_R + \eta_{St}$$

Eventualmente si può sommare anche  $\eta_G$  se la gravità ha un effetto rilevante.

Per passare all'efficienza complessiva di tutte le sfere che costituiscono il riempimento, si deve tenere conto della geometria del letto, ossia del grado di vuoto, dell'altezza del letto e della dimensione delle particelle.

[17] In particolare si considera il bilancio della concentrazione delle particelle su un elemento infinitesimo del letto di sfere di altezza  $dx$ . Il flusso in ingresso dell'elemento è  $QN|_x$ , quello in uscita è invece  $QN|_{x+dx}$ , dove  $Q$  è la portata volumetrica di fumi che attraversa il filtro. Allora il numero di particelle rimosse per unità di tempo nell'elemento  $dx$  è il prodotto tra la portata di fumi che entrano nell'elemento considerato e la frazione rimossa:

$$\left(\frac{\pi}{4} D^2 \eta N_s\right) (U_\infty N|_x) (A_c dx)$$

con  $D$  diametro delle sfere,  $N_s$  numero delle sfere nel letto,  $\eta$  efficienza di cattura della singola sfera,  $U_\infty$  velocità indisturbata del flusso,  $N|_x$  concentrazione in numero delle particelle nel gas all'altezza  $x$  del letto,  $A_c$  sezione della torre.

Allora dal bilancio per l'elemento  $dx$  si ha:

$$A_c U (N|_x - N|_{x+dx}) = \left(\frac{\pi}{4} D^2 \eta N_s\right) (U_\infty N|_x) (A_c dx)$$

con  $U$  velocità dei fumi all'interno dell'elemento filtrante e  $N|_{x+dx}$  concentrazione in numero delle particelle nel gas all'altezza  $x+dx$  del letto.

Come verrà spiegato più in dettaglio di seguito, la velocità dei fumi del letto e quella indisturbata sono legate dal grado di vuoto:

$$U = U_{\infty}(1 - \alpha).$$

Il numero di sfere è legato al grado di pieno:

$$N_s = \frac{\alpha}{\pi D^3/6}.$$

Allora introducendo le relazioni nel bilancio, per  $dx \rightarrow 0$  si ha:

$$\frac{dN}{dx} = -\frac{3}{2} \left( \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) \frac{\eta}{D} N,$$

imponendo che all'ingresso del letto ( $x = 0$ ) la concentrazione è  $N(0) = N_0$ , e all'uscita del letto, di altezza  $Z$ , la concentrazione è  $N(Z)$ , l'efficienza di cattura si ottiene integrando:

$$\frac{dN}{N} = -\frac{3}{2} \left( \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) \frac{\eta}{D} dx \rightarrow \frac{N(Z) - N_0}{N_0} = -\frac{3}{2} \left( \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) \frac{\eta}{D} Z$$

Per cui l'efficienza globale della regione contenete il letto formato da un riempimento casuale di corpi sferici è data da:

$$E = \frac{N_0 - N(Z)}{N_0} \rightarrow E = \frac{3 \alpha \eta Z}{2 (1 - \alpha) D}$$

dove appunto  $\eta$  è l'efficienza complessiva della singola sfera;  $Z$  è l'altezza del letto;  $\alpha$  il grado di pieno del letto ( $\alpha = 1 - \varepsilon$  con  $\varepsilon$  grado di vuoto) e  $D$  il diametro della sfera.

I parametri da cui dipende l'efficienza globale del letto sono:

**Z.** più è alto lo strato di sfere e più è alto il tempo di residenza dei fumi dentro al letto; inoltre i gas vengono maggiormente mescolati ed entrano in contatto con le sfere e il film liquido, per cui l'efficienza di cattura complessiva aumenta con l'altezza del riempimento.

**$\alpha$ .** All'aumentare del grado di pieno, l'efficienza globale aumenta, perché, a pari dimensione delle sfere e altezza del letto, se la frazione di volume occupata dal riempimento è maggiore, il numero delle sfere è più grande e quindi anche la superficie di contatto. Inoltre i fumi hanno meno spazio per il passaggio, per cui vengono accelerati e ne viene favorita la turbolenza.

**D.** Allo stesso modo, a pari grado di pieno e altezza del letto, se la dimensione delle sfere è più contenuta, significa che nel letto ce ne sono di più e quindi l'efficienza aumenta. Infine se la dimensione delle sfere è ridotta, aumenta la superficie di scambio tra liquido e gas.

Procedendo in questo modo però il valore dell'efficienza globale  $E$  per alcune dimensioni del particolato, e in particolare per quelle molto piccole ( $< 0.01 \mu\text{m}$ ) e per quelle sopra una certa dimensione (anche di  $1 \mu\text{m}$ , ma questi valori dipendono dalla geometria del letto e del riempimento), supera il valore unitario. Infatti il rendimento, per come è definito, essendo proporzionale all'altezza del letto, può raggiungere valori molto più grandi di 1: se lo strato del riempimento avesse idealmente un'altezza infinita ( $Z \rightarrow \infty$ ), anche l'efficienza globale andrebbe a infinito ( $E \rightarrow \infty$ ) e non a 1, come invece dovrebbe essere per un rendimento; ugualmente accade se  $D$  è molto piccolo o se  $\alpha$  tende al valore unitario.

Per riportare i valori di efficienza compresi tra 0 e 1, Lee utilizza per l'efficienza totale del letto una forma esponenziale:

$$\eta_{\text{tot letto}} = 1 - e^{-E}$$

Questa forma invece che avere come asintoto  $\infty$ , ha come valore asintotico 1, per cui mentre  $E$  comincia a diventare molto alto,  $\eta_{\text{tot letto}}$  cresce meno velocemente e rimane sempre sotto il valore unitario. Ciò comporta però una sottostima dell'efficienza su valori del diametro del particolato per i quali questa sarebbe più elevata, perché non riporta a 1 solo i valori che sarebbero maggiori dell'unità (in realtà si può notare che se l'efficienza della singola particella fosse unitaria,  $\eta=1$ , quella complessiva del letto sarebbe comunque al di sotto dell'unità,  $\eta_{\text{tot letto}} < 1$ ), ma abbassa anche

le efficienze  $E$  dell'ordine del 60%. Per valori più bassi dell'efficienza globale invece,  $E$  e  $\eta_{\text{tot letto}}$  sono praticamente uguali.

Allora, poiché quest'ultimo passaggio, non è altro che una sorta di artificio matematico per rendere effettivamente i valori dell'efficienza compresi tra 0 e 1, si preferisce non attuarlo, ma si usano i risultati ottenuti dalla valutazione di  $E$ : l'unico accorgimento che si esegue è porre proprio uguale a 1 i valori di  $E$  che risultano invece superiori all'unità.

### Velocità effettiva dei fumi

Nei parametri utilizzati per descrivere i meccanismi e le loro efficienze di filtrazione, compare spesso la velocità del flusso dei fumi  $U$ , ipotizzando che questa fosse anche la velocità del particolato all'ingrasso della torre, perché fumi e particolato vengono considerati inizialmente una fase continua.

È necessario allora precisare il valore della velocità  $U$ , a seconda degli elementi che i fumi attraversano nella torre.

Prendendo una qualsiasi sezione della torre, con  $U$  si indica la velocità dei fumi effettiva, ossia:

$$U = \frac{\dot{m}_G}{\rho_G A_{eff}}$$

con  $\dot{m}_G$  portata in massa dei fumi;  $\rho_G$  densità dei fumi e  $A_{eff}$  area effettiva di passaggio dei fumi in corrispondenza di una certa altezza della torre.

Allora bisogna considerare l'effettiva sezione di passaggio, ossia valutare come è riempita la torre: interviene quindi il grado di vuoto, ossia la frazione di spazio lasciata libera per il passaggio dei fumi.

Vale infatti:

$$A_{eff} = A_c \varepsilon_G$$

dove  $A_c$  è l'area della torre di lavaggio e  $\varepsilon_G$  il grado di vuoto, o più precisamente la frazione di sezione lasciata libera per il passaggio dei fumi solamente.

- Nel caso di filtrazione con gocce di acqua, la sezione di passaggio è divisa tra acqua e fumi per cui si ha:

$$\varepsilon_G = 1 - \alpha$$

in quanto  $\alpha$  indica la frazione di volume della torre occupata dall'acqua.

- Nel caso di riempimento casuale con corpi sferici invece vale:

$$\varepsilon_G = 1 - \alpha - \varepsilon_L$$

con  $\alpha$  frazione di volume occupata dalle sfere del letto e  $\varepsilon_L$  frazione di volume occupata dal liquido dentro il letto, che crea il film fluido sopra le sfere.

La valutazione della frazione di liquido dentro il letto non è semplice ed esistono diversi modelli per la sua determinazione. Per avere un'idea di questo parametro quello che si fa è realizzare una prova in cui si inietta acqua sopra le sfere che costituiscono il riempimento, successivamente si smette di inviare acqua, si aspetta che tutta l'acqua nel letto sia fuoriuscita e pesando l'acqua accumulata si può stimare quanto liquido andava a formare il film sulle sfere.

La frazione di liquido che aderisce al letto si è calcolata con il modello di Gímenes [22], secondo cui la frazione di acqua è data da:

$$\varepsilon_L = 9.75 \cdot 10^{-3} Z^{-0.357} \left( \frac{D}{\xi} \right)^{-0.411} L^{0.616} e^{0.237 U_s}$$

dove  $Z$  è l'altezza del letto (in cm);  $D$  è il diametro della sfera;  $\xi$  la sfericità (nel caso di sfere  $\xi=1$ );

$L$  è il flusso di acqua dato da  $L = \frac{\text{portata di acqua}}{\text{area della torre}} = \frac{\dot{m}_L}{A_c}$  e  $U_s$  è la velocità superficiale dei fumi

(quella che avrebbero i fumi se la torre fosse vuota:  $U_s = \frac{\dot{m}_G}{\rho_G A_c}$ ).



## 11 Bibliografia

- [1] *Ecoscienza*, Rivista di ARPA Emilia-Romagna, N° 1 Marzo 2015
- [2] *Stato dell'ambiente – Qualità dell'ambiente urbano*, Report di Ispra Ambiente, X Rapporto, Edizione 2014, N° 53/2014
- [3] *Air quality in Europe – 2013 report*, EEA Report, N° 9/2013
- [4] *Air quality in Europe – 2014 report*, EEA Report, N° 5/2014
- [5] G. Kieseewetter, J. Borken-Kleefeld, W. Schopp, C. Heyes, P. Thunis, B. Bessagnet, E. Terrenoire, H. Fagerli, A. Nyiri, M. Amann, *Modelling street level PM10 concentrations across Europe: source apportionment and possible futures*, Atmospheric Chemistry and Physics, 15, 1539-1553, 2015
- [6] *Energia e dintorni – Il CTI informa*, Rivista del Comitato Termotecnico Italiano, N° di Settembre 2014
- [7] P. Quark, H. Knoef, H. Stassen, *Energy from biomass: a review of combustion and gasification technologies*, World Bank Technical Paper, N° 422 Energy Series, 1999
- [8] S. Ghafghazi, T. Sowlati, S. Sokhansanj, X. Bi, S. Melin, *Particulate matter emissions from combustion of wood in district heating applications*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15, 3019-3028
- [9] N. P. Cheremisinoff, *Handbook of air pollution prevention and control*, Butterworth – Heinemann, 2002
- [10] P. Halser, T. Nussbaumer, *Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification*, Biomass Bioenergy, 1999, 16, 385-395



- [11] G. T. Joseph, D. S. Beachler, *Scrubber systems operation review – Self-instructional manual*, North Carolina State University, 1998
- [12] D. Musatti, P. Hemmer, *EPA air pollution control cost manual*, Sixth Edition, 2002
- [13] *Control techniques for particulate emissions from stationary sources*, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina, Volume 1, Settembre 1982
- [14] W. M. Vataavuk, *Estimating costs of air pollution control*, Lewis Publishers, Chelsea, Michigan, 1990
- [15] L. Golfera, *Manuale filtro*, 2014
- [16] N. H. Fletcher, *Size effect in heterogeneous nucleation*, The Journal of Chemical Physics, 1958, 29, 572
- [17] R. C. Flagan, J. H. Seinfeld, *Fundamentals of air pollution engineering*, Prentice Hall, 1998
- [18] P. Kulkarni, P. A. Baron, K. Willeke, *Aerosol measurement: principles, techniques and applications*, John Wiley & sons, Third Edition, 2011
- [19] Y. A. Cengel, J. M. Cimbala, *Meccanica dei fluidi*, McGraw-Hill, Edizione Italiana, 2007
- [20] W. C. Hinds, *Aerosol technology*, John Wiley and Sons, Second Edition, 1999
- [21] S. K. Friedlander, *Theory of aerosol filtration*, Industrial and Engineering Chemistry, 1958, Vol. 50, N° 8, 1161-1164
- [22] M. L. Gimenes, D. Handley, *A model for particle collection in a turbulent bed contactor – New packings*, Chemical Engineering Research & Design (Trans IChemE), 1998, Vol. 76, 855-863
- [23] K. W. Lee, *Particle collection mechanisms pertinent to granular bed filtration*, 1986

- [24] Y. Kang, F. Hua, K. Zhong, H. Zhu, *A new analysis of fine aerosol capture by raindrops at terminal velocities*, Journal of Aerosol Science, 2015, 89, 31-42
- [25] C. H. Jung, K. W. Lee, *Filtration of fine particles by multiple liquid droplet and gas bubble systems*, Aerosol Science and Technology, 1998, 29, 389-401
- [26] W. Coffey, Y. P. Kalmykov, T. Waldron, *The Langevin equation: with applications in physics, chemistry and electrical engineering*, World Scientific Publishing, 1996
- [27] A. Einstein, *Investigations on the theory of the Brownian movement*, Dover Publications, 1956
- [28] K. W. Lee, J. A. Gieseke, *Collection of aerosol particles by packed beds*, Environmental Science & Technology, 1979, Vol. 13, N° 4, 466-470
- [29] S. K. Friedlander, *Particle diffusion in low-speed flow*, Journal of Colloid and Interface Science, 1967, Vol. 23, 157-164
- [30] X. Li, L. Duan, S. Wang, J. Duan, X. Guo, H. Yi, J. Hu, C. Li, J. Hao, *Emission characteristics of particulate matter from rural household biofuel combustion in China*, Energy & Fuels, 2007, Vol. 21, 845-851
- [31] C. L'Orange, J. Volckens, M. DeFoort, *Influence of stove type and cooking pot temperature on particulate matter emissions from biomass cook stoves*, Energy and Sustainable Development, 2012, Vol. 16, 448-455
- [32] C. Boman, A. Nordin, D. Bostrom, M. Ohman, *Characterization of inorganic particulate matter from residential combustion of pelletized biomass fuels*, Energy and Fuels, 2004, Vol. 18, 338-348
- [33] H. T. Kim, C. H. Jung, S. N. Oh, K. W. Lee, *Particle removal efficiency of gravitational wet scrubber considering diffusion, interception and impaction*, Environmental Engineering Science, 2001, Vol. 18, N° 2, 125-136

- [34] D. Ayres, M. Caldas, V. Semiao, M. da Graca Carvalho, *Prediction of the droplet size and velocity joint distribution for sprays*, Fuel, 2001, Vol. 80, 383-394
- [35] C. S. Wen, *The fundamentals of aerosol dynamics*, World Scientific Publishing, 1975
- [36] R. H. Perry, D. W. Green, *Perry's chemical engineers' handbook*, McGraw Hill, 1999
- [37] K.C. Schiffner, H.E. Hesketh, *Wet scrubbers: a practical handbook*, Lewis Publishers, Chelsea, Michigan, 1986
- [38] K. Darcovich, K.A. Jonasson, C.E. Capes, *Developments in the control of fine particulate air emissions*, Advanced Powder Technology, 1997, Vol. 8, N° 3, 179-215
- [39] A. Charvet, N. Bardin-Monnier, D. Thomas, *Can bubble columns be an alternative to fibrous filters for nanoparticles collection?*, Journal of Hazardous Materials, 2011, 195, 432-439
- [40] T. Yoshida, Y. Kousaka, K. Okuyama, *Growth of aerosol particle by condensation*, Industrial & Engineering Chemistry Research, 1976, Vol. 15, N° 1, 37-41
- [41] M. V. Panchagnula, P. E. Sojka, *Spatial droplet velocity and size profiles in effervescent atomizer-produced sprays*, Fuel, 1999, Vol. 78, 729-741
- [42] T. V. Thelen, W. F. Ramirez, *Bed-height dynamics of expanded beds*, Chemical Engineering Science, 1997, Vol. 52, N° 19, 3333-3344
- [43] U. Fernandez, M. Costa, *Formation of fine particulate matter in a domestic pellet-fired boiler*, Energy & Fuels, 2.13, 27, 1081-1092
- [44] U. Fernandez, M. Costa, *Particle emissions from a domestic pellets-fired boiler*, Fuel Processing Technology, 2012, 103, 51-56
- [45] H.P. Zhu, Z. Y. Zhou, R. Y. Yang, A. B. Yu, *Discrete particle simulation of particulate systems: theoretical developments*, Chemical Engineering Science, 2007, 62, 3378 -3396

- [46] Autori R.C. Flagan, J. H. Seinfeld; Fundamentals of air pollution engineering; ed: Prentice Hall
- [47] Nicholas P . Cheremisinoff and John Rezaian; Gasification Technologies: A Primer for Engineers and Scientists; ed CRC Press 2005
- [48] M. Carpentieri, Università di Firenze, ‘Interazione tra le macchine e l’ambiente’
- [49] P. De Filippis, M. Scarsella, B. De Caprariis, G. Belotti; Tecniche di campionamento e rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas da gassificazione del carbone ; ENEA Report RdS/2010/22
- [50] K. Sutherland; Filter and filtration Handbook Ved; Butterworth-Heinemann
- [51]GRIGOLATO, S. et al ‘Supply of logging residues for energy production: A GIS-based study. 2005

## *Normative*

Decreto Legislativo del 3 Marzo 2011, N° 28 (D.Lgs. 28/2011) - *Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE*

Direttiva Europea del 21 Maggio 2008, N° 50 (Directive 2008/50/EC) - *On ambient air quality and cleaner air for Europe*

Decreto Legislativo del 3 Aprile 2006, N° 152 (D. Lgs. 152/2006) – *Norme in materia ambientale*

UNI 10169:2001 - *Determinazione della velocità e della portata di flussi gassosi convogliati per mezzo del tubo di Pitot*

UNI EN 13284-1:2003 - *Emissioni da sorgente fissa - Determinazione della concentrazione in massa di polveri in basse concentrazioni - Metodo manuale gravimetrico*

UNI EN ISO 23210: 2009 - *Emissioni da sorgente fissa - Determinazione della concentrazione in massa di PM10/PM 2,5 negli effluenti gassosi - Misurazione a basse concentrazioni mediante l'uso di impattori multistadio*

UNI EN 14907:2005 - *Qualità dell'aria ambiente - Metodo normalizzato di misurazione gravimetrico per la determinazione della frazione massica PM 2,5 del particolato in sospensione*

UNI EN 12341: 2001 - *Qualità dell'aria - Determinazione del particolato in sospensione PM10 - Metodo di riferimento e procedimento per prove in campo atte a dimostrare l'equivalenza dei metodi di misurazione rispetto al metodo di riferimento*